

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Índices de seca agrícola e meteorológica para algumas localidades no estado
do Rio Grande do Sul**

Suélen Cristiane Riemer da Silveira

Pelotas, 2016

SUÉLEN CRISTIANE RIEMER DA SILVEIRA

**Índices de seca agrícola e meteorológica para algumas localidades no estado
do Rio Grande do Sul**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Dr^a Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra

Co-Orientadora: Dr^a Rita de Cássia Fraga Damé

Pelotas, 2016

SUÉLEN CRISTIANE RIEMER DA SILVEIRA

Índices de seca agrícola e meteorológica para algumas localidades no estado do Rio
Grande do Sul

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 18/02/2016

Banca examinadora:

Prof. Dr^a Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra (Orientadora)
Doutora em Agronomia pela Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Marcelo Peske Hartwig
Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo

Prof. Dr^a Viviane Santos Silva Terra
Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S111i Silveira, Suélen Cristiane Riemer Da

Índices de seca agrícola e meteorológica para algumas localidades no Estado do Rio Grande do Sul / Suélen Cristiane Riemer Da Silveira ; Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra, Rita de Cássia Fraga Damé, orientadoras. — Pelotas, 2016.

102 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Índice de Severidade de Seca de Palmer. 2. Índice de Anomalia de Umidade de Palmer. 3. Índice Padronizado de precipitação. 4. Seca. I. Teixeira-Gandra, Claudia Fernanda Almeida, orient. II. Damé, Rita de Cássia Fraga, orient. III. Título.

CDD : 631.4

Dedico este trabalho aos meus pais, a quem não se limitaram apenas a me dar a vida, ensinaram-me a viver. Com todo o amor, carinho e dedicação e que por várias vezes abriram mão de seus sonhos em favor dos meus.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado guiando meus passos e por ter permitido que alcançasse a graça de mais uma vitória.

Aos meus pais, que me deram o mais importante da vida, amor e educação, por estarem sempre ao meu lado, me incentivando a seguir sempre em frente, em busca de meus objetivos e pelo apoio quando me sentia desanimada.

Aos meus familiares, minhas irmãs e meu namorado obrigada pelo carinho, dedicação, apoio e compreensão, pela paciência em alguns momentos difíceis desta caminhada e por sempre me incentivar a seguir em frente.

À minha orientadora Prof^a Dr^a Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra minha eterna gratidão pela oportunidade, pelo carinho, pela confiança e por acreditar na minha capacidade e contribuir para meu crescimento profissional.

À minha co-orientadora Prof^a Dr^a Rita de Cássia Fraga Damé, pelo apoio, pelos conselhos e ao conhecimento adquirido ao longo desta caminhada.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, que contribuíram para meu crescimento acadêmico e profissional.

À Universidade Federal de Pelotas, pela oportunidade de realizar o curso de Pós-Graduação em Manejo Conservação do Solo e da Água.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Aos colegas da Pós-Graduação pelo apoio e incentivo durante todo o curso.

A todas as pessoas que de uma forma ou de outra me ajudaram na realização deste trabalho.

*“Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado,
mas nada pode ser modificado até
que seja enfrentado”.*

(Albert Einstein)

Resumo

SILVEIRA, Suélen Cristiane Riemer da. **Índices de seca agrícola e meteorológica para algumas localidades no estado do Rio Grande do Sul**. 2016. 102f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

O estado do Rio Grande do Sul, conhecido pela sua produção agrícola tem sido afetado pela queda na produtividade das principais culturas, em decorrência de longos períodos sem precipitação. Os impactos da seca têm influência direta nas atividades agrícolas e econômicas do estado, refletindo-se na baixa disponibilidade de umidade no solo, o que torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas. Pesquisar a influência da seca na disponibilidade de recursos hídricos, como sua caracterização para identificação de períodos secos, poderá possibilitar o monitoramento dos seus efeitos, auxiliando no planejamento e na diminuição dos seus impactos. Para tanto são utilizados alguns índices de secas que possibilitam quantificar e classificar este fenômeno. Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi caracterizar o comportamento da seca agrícola e meteorológica, a partir da utilização do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), em algumas localidades do estado do Rio Grande do Sul. Para tanto foram utilizados dados de temperatura média do ar e de precipitação pluvial de 12 postos meteorológicos do Estado, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia e pela Agência Nacional de Águas, contemplando um período de 53 anos de dados, para o período de 1961 a 2013. Para o cálculo dos índices PDSI e Z foram utilizadas equações do balanço hídrico climatológico, realizado pelo método descrito por Thornthwaite (1948), adotando uma capacidade de água disponível no solo de 100 mm para todas as localidades. Os resultados mostraram que o índice PDSI apresentou maiores eventos de secas severas e extremas em relação aos índices SPI e Z. Considerando a análise comparativa dos eventos de secas, o SPI teve maior proximidade do PDSI, quanto ao número de eventos e boa correlação quando aplicado o modelo linear, apesar das correlações entre o SPI e o índice Z também não mostrarem diferença significativa pelo teste t, do parâmetro angular do ajuste linear, a 5% de probabilidade de erro.

Palavras chave: Índice de Severidade de Seca de Palmer, Índice de Anomalia de Umidade de Palmer, Índice Padronizado de Precipitação, Seca.

Abstract

SILVEIRA, S. C. R. **Agricultural and meteorological drought index to some locations in the state of Rio Grande do Sul. 2016.** 102f. Thesis (MA) - Graduate Program in Management and Conservation of Soil and Water. Federal University of Pelotas, Pelotas, 2016.

The state of Rio Grande do Sul, known for its agricultural production has been affected by the fall in the productivity of major crops due to long periods without precipitation. The drought impacts have direct influence on agricultural and economic activities of the state, reflected in the low moisture availability in the soil, which makes the water supply to crops insufficient to replace losses. Search the influence of drought on the availability of water resources, as its characterization for identifying dry periods, can enable for both are used some drought indices is possible to quantify and classify this phenomenon. The monitoring of their effects, assisting in planning and reduction of their impacts. Thus, the objective of this study was to characterize the behavior of agricultural and dry weather, from the use of drought Palmer Severity Index (PDSI), Palmer Moisture Anomaly Index (Z) and the Standardized Precipitation Index (SPI), in some localities of Rio Grande do Sul state. Therefore, we used data Average air temperature and precipitation of 12 meteorological stations in the Rio Grande do Sul, provided by the National Institute of Meteorology and the National Water Agency, covering a period of 53 years of data for the 1961 period 2013. To calculate the PDSI and Z index were used climatological water balance equations, performed by the method described by Thornthwaite (1948), adopting a water capacity available in 100 mm ground for all locations. The results showed that the PDSI index showed the biggest events of severe and extreme droughts in relation to SPI and Z indices Considering the comparative analysis of drought events, the SPI had closer the PDSI in the number of events and good correlation when applied linear model, although the correlation between the SPI and the Z index did not show significant difference by t test, the angular parameter linear fit, 5% error probability.

Keywords: Palmer Drought Severity Index, Z-index, Standardized Precipitation Index, Drought.

Lista de Figuras

Figura 1	Localização das 12 estações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul.....	34
Figura 2	Médias mensais das precipitações (mm), no período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul, Iraí, Passo Fundo e Pelotas.....	48
Figura 3	Médias mensais das precipitações (mm), no período de 1961 a 2013, para as localidades de Porto Alegre, Santa Maria, Santa Vitória do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana.....	49
Figura 4	Comportamento dos valores mensais do Índice de Seca de Palmer (PDSI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul e Iraí.	52
Figura 5	Comportamento dos valores mensais do Índice de Seca de Palmer (PDSI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria.....	53
Figura 6	Comportamento dos valores mensais do Índice de Seca de Palmer (PDSI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Santa Vitoria do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana.....	54
Figura 7	Comportamento dos valores mensais do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul e Iraí.....	57
Figura 8	Comportamento dos valores mensais do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria.....	56

Figura 9	Comportamento dos valores mensais do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Santa Vitória, São Luiz Gonzaga, T Torres e Uruguaiana.....	58
Figura 10	Comportamento dos valores mensais do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul e Iraí.....	60
Figura 11	Comportamento dos valores mensais do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), para o período de 1961 a 2013, nas localidades de Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria.....	61
Figura 12	Comportamento dos valores mensais do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Santa Vitória do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana.....	62
Figura 13	Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para a localidade de Bagé.....	76
Figura 14	Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bom Jesus e Encruzilhada do Sul.....	77
Figura 15	Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Iraí e Passo Fundo.....	78
Figura 16	Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Pelotas e Porto Alegre.....	79

Figura 17	Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Santa Maria e Santa Vitória do Palmar.....	80
Figura 18	Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de São Luiz Gonzaga e Torres.....	81
Figura 19	Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para a localidade de Uruguaiana.....	82
Figura 20	Correlações entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, considerando o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus e Encruzilhada do Sul.....	84
Figura 21	Correlações entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, considerando o período de 1961 a 2013, para as localidades de Iraí, Passo Fundo e Pelotas.....	85
Figura 22	Correlações entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, considerando o período de 1961 a 2013, para as localidades de Porto Alegre, Santa Maria e Santa Vitória do Palmar.....	86
Figura 23	Correlações entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, considerando o período de 1961 a 2013, para as localidades de São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana.....	87

Lista de Tabelas

Tabela 1	Caracterização das 12 estações meteorológicas localizadas em algumas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul	35
Tabela 2	Valores arbitrários de t , X_i , X_{i-1} e ΔX , segundo Palmer (1965)	42
Tabela 3	Classificação da intensidade da umidade e da seca, de acordo com o Índice de Severidade de Palmer (PDSI)	43
Tabela 4	Classificação da intensidade da umidade e da seca, de acordo com o Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z).....	44
Tabela 5	Classificação do excesso e déficit de acordo com o Índice Padronizado da Precipitação (SPI).....	46
Tabela 6	Total de eventos de seca severa para cada localidade e para os três índices analisados.....	65
Tabela 7	Número de eventos de seca severa, considerando o índice PDSI, para a escala mensal.....	66
Tabela 8	Número de eventos de seca severa, considerando o índice Z, para a escala mensal.....	67
Tabela 9	Número de eventos de seca severa, considerando o índice SPI, para a escala mensal.....	68
Tabela 10	Total de eventos de seca extrema para cada localidade e para os três índices analisados.....	70
Tabela 11	Número de eventos de seca extrema, considerando o índice PDSI, para a escala mensal para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul, Iraí, Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria.....	70
Tabela 12	Número de eventos de seca extrema, considerando o índice PDSI, para a escala mensal para as localidades de Santa Vitória do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana..	71

Tabela 13	Número de eventos de seca extrema, considerando o índice Z, para a escala mensal.....	70
Tabela 14	Número de eventos de seca extrema, considerando o índice SPI, para a escala mensal.....	72
Tabela 15	Contagem dos maiores períodos de ocorrência dos eventos de seca severa para os municípios do estado do Rio Grande do Sul, considerando os três índices.....	73
Tabela16	Contagem dos maiores períodos de ocorrência dos eventos de seca extrema para os municípios do estado do Rio Grande do Sul, considerando os três índices.....	75
Tabela 17	Resultados obtidos para o parâmetro angular (β_1) entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul.....	88
Tabela 18	Equações de regressão linear, estatística do teste t para o parâmetro angular (β_1) e coeficiente de regressão (R) obtidos entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul, considerando o mês de novembro.....	90
Tabela 19	Equações de regressão linear, estatística do teste t para o parâmetro angular (β_1) e coeficiente de regressão (R) obtidos entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul, considerando o mês de dezembro.....	91
Tabela 20	Equações de regressão linear, estatística do teste t para o parâmetro angular (β_1) e coeficiente de regressão (R) obtidos entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul, considerando o mês de janeiro.....	91

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Geral.....	19
2.2	Específicos.....	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	A Seca no Estado do Rio Grande do Sul.....	20
3.2	Indicadores para Quantificação da Seca.....	22
3.2.1	Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)	23
3.2.1.1	Balanço Hídrico (BH).....	25
3.2.2	Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z).....	28
3.2.3	Índice Padronizado de Precipitação (SPI).....	29
3.3	Influência dos Fenômenos El Niño e La Niña.....	30
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4.1	Classificação do Clima e da Região de Estudo.....	33
4.2	Dados Meteorológicos.....	33
4.3	Balanço Hídrico Climatológico.....	36
4.4	Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).....	37
4.5	Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z).....	43
4.6	Índice Padronizado de Precipitação (SPI).....	44
4.7	Comparação entre os Índices Agrícolas e Meteorológico.....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1	Caracterização do Regime Pluvial das Localidades Analisadas.....	48
5.2	Comportamento das Séries Temporais com Base nos Resultados do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).....	51
5.3	Comportamento das Séries Temporais com Base nos Resultados do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z).....	55
5.4	Comportamento das Séries Temporais com Base nos Resultados do Índice Padronizado de Precipitação (SPI).....	59
5.5	Análise Conjunta dos Índices Agrícolas e Meteorológico.....	63
5.6	Ocorrência de Eventos de Seca Severa e Extrema.....	64
5.6.1	Número de Ocorrências de Eventos de Seca Severa.....	64

5.6.2 Número de Ocorrências de Eventos de Seca Extrema.....	68
5.6.3 Sequências de Períodos de Seca Severa e Extrema.....	72
5.7 Análise dos Índices de Seca em Escala Anual.....	76
5.8 Comparação Entre os Índices em Escala Anual.....	83
6 CONCLUSÕES.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas que vêm ocorrendo mundialmente alertam para um aumento de eventos meteorológicos extremos, sendo crescente a preocupação da população em relação aos danos causados ao ambiente. No Brasil, existem vários exemplos de impactos adversos da variabilidade natural do clima, geradores de enormes prejuízos econômicos e sociais, causados principalmente pelas secas, inundações e geadas. A questão da possível alteração dos eventos climáticos remete ao problema da fragilidade das populações e dos ecossistemas a estas mudanças.

Apesar da safra agrícola de 2014/2015 ter sido prejudicada pelo excesso de chuva no estado do Rio Grande do Sul, em função da ocorrência do fenômeno El Niño, com chuvas acima da média, a seca é considerada um dos fenômenos naturais importantes devido a sua influência na agricultura e no desenvolvimento econômico de uma determinada região. O referido fenômeno é uma anomalia que pode ocorrer em todos os regimes climáticos, normalmente caracterizado como uma alteração temporária do clima de uma região, decorrente de precipitações pluviais abaixo da normal climatológica, por certo período.

Com relação ao fenômeno La Niña, com chuvas abaixo da média, somente na safra 2004/2005, as perdas de rendimento de grãos de soja, em kg ha^{-1} , nos estados do Rio Grande do Sul e Paraná, atingiram mais de 78 e 23%, respectivamente, quando comparadas à safra 2002/2003, onde não ocorreram problemas de seca.

A seca ocorre devido à redução da quantidade de precipitação associado aos elementos climáticos como temperatura elevada, ventos fortes e baixa umidade do ar, além de condições locais de solo, como a capacidade de armazenamento de água no mesmo. Deste modo as mudanças no clima terrestre podem afetar os componentes do ciclo hidrológico e, por consequência, na disponibilidade de recursos hídricos, duração dos períodos secos e de inundações. O conteúdo de umidade do solo é um dos componentes do ciclo hidrológico, que influencia diretamente na quantidade de água disponível para as culturas agrícolas, o que por sua vez afeta o seu desenvolvimento, crescimento e rendimento, bem como a necessidade ou não da técnica da irrigação (STRECK e ALBERTO, 2006).

Os impactos da seca têm influência direta nas atividades agrícolas, refletindo-se na baixa disponibilidade de umidade no solo, o que torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas. Com origem na deficiência de precipitação, a seca pode ser definida como seca meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica. A partir desta classificação, diversos indicadores têm sido utilizados na análise de eventos de seca.

Os indicadores ou índices de seca têm se apresentado, ao longo dos anos, como uma ferramenta útil na caracterização desses eventos. Uma das formas conhecidas de estabelecer a severidade de eventos de seca é através da aplicação de índices como o Padronizado de Precipitação, o de Moreno, entre outros, considerados meteorológicos, e o Índice Padronizado de Palmer, considerado agrícola. A utilização dos referidos índices possibilita estabelecer um panorama com relação ao comportamento de eventos extremos nas diversas regiões, caracterizando-as quanto ao comportamento hídrico.

O estado do Rio Grande do Sul, conhecido pela sua produção agrícola tem sido afetado pela redução na produtividade das principais culturas, em decorrência de longos dias sem precipitação. A redução na produtividade agrícola, ocasionado pelos eventos de seca severa e extrema, acarretam grandes prejuízos, tanto no setor econômico como para os produtores, ocasionando perdas nas diversas atividades humanas. Deste modo pesquisar a influência da seca na disponibilidade de recursos hídricos, assim como sua caracterização para identificação de períodos secos, possibilitará o monitoramento dos seus efeitos, auxiliando no planejamento e na diminuição dos seus impactos.

Em um país como o Brasil, em que a agricultura possui grande importância, é fundamental que se busque entender as respostas das culturas às condições climáticas. Desta forma, a hipótese deste trabalho é de que é possível utilizar índices caracterizados como agrícolas e meteorológico para descrever as ocorrências do fenômeno em tela, e que a partir dos mesmos é possível que ocorra correlação entre eles, permitindo o uso apenas da precipitação como variável de entrada.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Caracterizar o comportamento das secas agrícolas e meteorológica a partir da utilização do Índice de Severidade de Seca de Palmer, do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer e do Índice Padronizado de Precipitação, em algumas localidades do estado do Rio Grande do Sul.

2.2 Específicos

Analisar o desempenho do Índice de Severidade de Seca de Palmer e do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer, considerando a capacidade de água disponível de 100 mm, para todas as estações meteorológicas.

Calcular o Índice Padronizado de Precipitação, considerando apenas a escala temporal mensal, para todas as estações meteorológicas.

Detectar os períodos de seca e caracterizá-los de acordo com as classes de severidade, para cada um dos índices utilizados.

Comparar os valores dos índices agrícolas e meteorológico para as localidades analisadas, com o objetivo de verificar se é possível o uso de um índice considerado mais simples (meteorológico), em detrimento de índices mais complexos (Índice de Severidade de Seca de Palmer e Índice de Anomalia de Umidade de Palmer).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Seca no Estado do Rio Grande do Sul

A seca é um fenômeno meteorológico que ocorre devido às condições climáticas, sendo seu processo caracterizado de forma lenta, se comparado aos eventos de cheias, que acontecem de forma rápida. A ocorrência do fenômeno pode atingir qualquer região e suas consequências são sentidas nas mais diversas áreas, como na agricultura, pecuária, geração de energia, consumo industrial e doméstico, dentre outras (CUNHA, 2008).

Para Pereira et al. (2009), a seca é um fenômeno natural que resulta de valores de precipitação abaixo da média, com impactos no déficit de água no nível hidrológico, ecológico, agrícola e econômico. A sua frequência de ocorrência, duração e severidade são aleatórias e incertas, tornando um fenômeno crítico e muitas vezes desastroso.

O clima brasileiro apresenta uma grande variabilidade, oscilando do tropical no centro-norte ao temperado no Sul, e de úmido na parte norte da região amazônica ao semi-árido, na maior parte da Região Nordeste, onde o bioma Caatinga prevalece. Mesmo em regiões úmidas, como a Floresta Amazônica e a região dos Pampas, no Rio Grande do Sul, têm experimentado períodos de seca severa durante os últimos anos, causando desastres para diversas atividades humanas, principalmente a agricultura (SENTELHAS, 2010).

A variabilidade climática é uma característica marcante no Rio Grande do Sul, onde os fenômenos meteorológicos causam, com frequência, danos às atividades agrícolas. Matzenauer (2002) destaca que nos últimos 20 anos, ocorreram 10 secas no Estado, que causaram a redução de 38 milhões de toneladas de grãos, nas culturas de milho e soja, consideradas as mais prejudicadas.

Para Sansigolo (2004), a seca é um fenômeno causado pelo déficit de precipitação em relação à evapotranspiração, considerada como de ocorrência temporária, com uma duração, magnitude e severidade características. Na definição desse fenômeno é possível distinguir quatro tipos: a seca meteorológica, a agrícola, a hidrológica e a econômica.

Segundo Cunha (2008), a seca meteorológica está relacionada às ocorrências de precipitação de uma região abaixo das normais esperadas e caracteriza-se pela

falta de água induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outros elementos, como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação. É, portanto, característica da região de ocorrência, pois depende das condições atmosféricas e é considerada como referência para que ocorram os outros tipos de seca.

A seca agrícola está relacionada às condições do solo, pois ocorre quando os déficits de precipitação auxiliam a reduzir a disponibilidade de água e reservatórios, causando a perda de culturas e consequente diminuição na produtividade agrícola. É consequência da meteorológica, pois influencia na evaporação, contribuindo para a redução da água no solo, associada ao desequilíbrio entre a água disponível e a necessidade hídrica das culturas, o que pode levar a perda de produção. Este tipo de seca pode ser minimizado se houver estruturas para armazenamento de água, uma vez que associada à disponibilidade de água no solo, podem facilitar o crescimento e desenvolvimento das plantas (CUNHA, 2008; FERNANDES et al., 2009).

A seca hidrológica é considerada como uma consequência da seca meteorológica, pois ocorrem alterações e mudanças no sistema hidrológico, quando há diminuição de água nos talvegues dos rios, gerando redução da água disponível. A seca hidrológica, mesmo tendo o clima como principal gerador, ainda pode ter seu processo acelerado através de práticas antrópicas, como o uso inadequado do solo, desmatamento e construção de barragens. Nos períodos em que os níveis dos rios e reservatórios estejam abaixo dos normais, a umidade do solo é insuficiente para suprir a necessidade das plantas (CUNHA, 2008).

Já a seca socioeconômica ocorre quando as reservas de água disponíveis não são suficientes para atender às necessidades humanas, podendo estar relacionada ao aumento populacional e, ainda, em última análise, como consequência dos demais tipos de seca.

A precipitação pluvial média do estado do Rio Grande do Sul apresenta níveis suficientes de chuva para o desenvolvimento das principais culturas, no entanto, a evapotranspiração nos períodos mais quentes do ano, têm levado, em anos menos chuvosos, à um déficit de umidade disponível para as culturas, ocasionando quebras de safras, com redução da produtividade.

3.2 Indicadores para Quantificação da Seca

No sentido de caracterizar o fenômeno da seca, vários índices têm sido desenvolvidos objetivando quantificar, em termos gerais, o quanto a precipitação, para um dado período de tempo, desvia-se da normal climatológica. Na aplicação dos indicadores são utilizadas equações com base em variáveis climáticas e procedimentos estatísticos para determinar a intensidade, a duração e a frequência com que essa anomalia ocorre. Embora não haja consenso na literatura com relação a superioridade de alguns índices frente aos demais, alguns deles são melhor ajustáveis.

Os índices de seca variam de acordo com o grau de complexidade. Os mais simples são apenas desvios da precipitação em relação à sua média climatológica, enquanto os mais complexos, como o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), incorporam as condições de umidade do solo (PALMER, 1965; LIMEIRA et al., 2007).

Palmer (1965) desenvolveu o PDSI, a partir de definições de períodos secos, como sendo um espaço de tempo, de um modo geral, de ordem de meses ou anos de duração, no qual o suprimento de água é menor que o climaticamente esperado ou apropriado. O PDSI, amplamente utilizado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América para determinar quando financiar a assistência de emergência à seca, é melhor quando aplicado para grandes áreas com topografia uniforme.

Outro índice que vem sendo utilizado é o Padronizado de Precipitação (SPI), desenvolvido por McKee et al. (1993), que possibilita estabelecer a intensidade da seca, considerando várias escalas temporais (1, 3, 6, 9, 12 e 24 meses), necessitando apenas de dados de precipitação total mensal. Segundo os autores, o SPI tem uma maior capacidade de detecção e monitoramento da seca, além de contornar algumas limitações do PDSI. Fisicamente, o SPI para um dado período de tempo é a diferença entre a precipitação observada e a média dividida pelo desvio padrão.

Além dos índices citados, existem ainda o de Moreno, o de Porcentagem Normal, o de Aridez, o Hídrico, o de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), o de Anomalia de Chuva (RAI), entre outros (NERY et al., 2000; BLAIN e BRUNINI, 2007;

BLAIN et al., 2010; MISHRA e SINGH, 2010; FERNANDES et al., 2010; FRANCISCO et al., 2015), os quais requerem diferentes variáveis e metodologias de cálculo, sendo, portanto, necessário selecionar aqueles em que se dispõe dos dados de entrada, com foco no objetivo fim.

Em estudos sobre os conceitos de seca em países da Europa, Ásia, África e entre outros, Mishra e Singh (2010) analisaram a importância do fenômeno e o impacto das mudanças climáticas sobre o mesmo, levando em consideração alguns parâmetros hidrológicos e climáticos. Os autores concluíram sobre a importância da mitigação da seca, a partir dos estudos relacionados aos índices de seca, bem como a comparação entre esses dois parâmetros, a fim de amenizar o impacto da mesma.

3.2.1 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

O PDSI foi desenvolvido por Palmer em 1965, como um índice agrícola, com o objetivo de identificar e estimar a severidade da seca, disponibilizando valores padronizados das condições de umidade, de forma a permitir comparações espaciais e temporais. Inicialmente foi desenvolvido e aplicado nos EUA, em duas divisões climáticas (Central Iowa e Western Kansas), a partir de relações empíricas estabelecidas para o seu cálculo, utilizando um conjunto restrito de dados. Este índice baseia-se no balanço hídrico do solo, cujo modelo de Palmer tem como dados de entrada, os valores de precipitação diária, a evapotranspiração potencial e a capacidade de água disponível no solo (CAD).

O PDSI é considerado um índice de umidade de solo desenvolvido para regiões homogêneas, medindo a perda e a demanda de armazenamento de água do solo (PALMER, 1965). O objetivo do referido índice é fornecer medidas normalizadas das condições de umidade, de modo que comparações possam ser feitas entre localidades e entre meses diferentes. O índice é calculado utilizando como dados de entrada todos os termos da equação do balanço hídrico, incluindo a evapotranspiração, recarga do solo e perda de umidade na camada superficial do solo. Para tanto, são estabelecidos critérios para determinar quando um período seco ou úmido começa e termina, variando de -4,0 a +4,0, designado de modo que uma seca extrema (-4,0) e severa (-3,0), em uma divisão climática tenham o mesmo significado.

Palmer (1965) buscou um índice de severidade que satisfizesse as necessidades hidrológicas e agrícolas, que vem sendo usado com sucesso. Em suas principais suposições, relacionadas ao cálculo dos componentes do balanço hídrico e à natureza empírica dos coeficientes de padronização, concluiu que o PDSI é uma ferramenta útil para a pesquisa e monitoramento de eventos de seca.

Limeira et al. (2007) calcularam o PDSI para a Paraíba, no período entre 1979 e 1983, cujos resultados encontrados mostraram que no ano de 1983 ocorreu seca severa (-3,00 a -3,99), segundo a classificação de Palmer. O PDSI apresentou-se coerente com a climatologia no local estudado, não apresentando resultados distorcidos, em comparação com os eventos de chuva observados, dentro do período analisado.

Com o objetivo de avaliar a seca hidro-meteorológica na bacia hidrográfica de São Roque, em Córdoba, Vicario (2008) utilizou o PDSI e o Índice Padronizado de Precipitação (SPI), a partir de dados de precipitações médias mensais para o período de 1943-1999. Os resultados obtidos permitiram concluir que as ocorrências de secas severas, obtidas pelo índice SPI foram praticamente iguais às estimadas pelo PDSI. No entanto, os valores obtidos pelo índice SPI, que caracterizam a seca severa, foram superiores aos calculados pelo PDSI. Uma das possíveis causas desta diferença, é que o SPI pondera a precipitação e sua relação com eventos de chuvas anteriores e não considera a influência das condições do solo, da atmosfera e da vegetação na distribuição da água precipitada, ou seja, não leva em conta a infiltração e nem a evapotranspiração.

Santos (2008) analisou o impacto da seca, através dos índices PDSI e índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), na produtividade do milho no estado de Minas Gerais, considerando a produtividade observada nos últimos anos, no período de 1973 a 2004. Os resultados obtidos permitiram concluir que os resíduos calculados pelo índice Z, dos meses de dezembro e novembro foram os mais adequados para prever os desvios da produtividade de milho nas mesorregiões estudadas no Estado. Contudo, os baixos valores do coeficiente de determinação e do índice de concordância de Willmott, indicam que apenas este índice não é suficiente para estimar toda a variabilidade dos resíduos observados (desvios da tendência tecnológica). Apesar dos índices PDSI e Z ainda serem alguns dos mais utilizados, possuem algumas deficiências, pois não consideram nenhuma

característica da cultura. O autor considera ainda que como o solo é dividido em duas camadas fixas e não é avaliado o tipo de solo e a distribuição da água nas suas camadas, estes podem ser fatores restritivos ao uso dos referidos índices. Ao mesmo tempo, sugere que outros índices de seca agrícola devem ser testados, objetivando melhores predições.

A seca agrícola, um dos objetos deste estudo, refere-se a situações com redução na quantidade de água disponível nas diferentes camadas do solo, afetando o rendimento das culturas. Este tipo de seca apresenta um tempo maior de resposta às mudanças na precipitação pluvial e o seu impacto depende da sua duração, em relação a fase em que a cultura se encontra (PAZ et al., 2010).

O índice Z representa um termo intermediário produzido pelo algoritmo do PDSI e resulta da normalização dos desvios de umidade (d), por intermédio de um fator de ponderação designado Característica Climática (K), que permite que Z seja comparável entre diferentes regiões e meses. O índice Z reflete os desvios de umidade do solo em relação as condições "normais" e às vezes é usado como um índice de seca por si só, principalmente para refletir as anomalias de umidade a curto prazo (KARL, 1986; QUIRING e PAPAKRYIAKOU, 2003).

3.2.1.1 Balanço Hídrico (BH)

A água é um dos fatores que mais influencia a produção agrícola, principalmente em áreas que não são irrigadas. Portanto, informações sobre a duração, quantidade e distribuição das chuvas, é de fundamental importância para o planejamento das atividades agrícolas e para a definição das datas mais adequadas ao uso do solo, como o preparo e o plantio (CARVALHO et al., 2000).

Nesse sentido, conhecer a disponibilidade hídrica no solo é fundamental para o desenvolvimento das culturas, a qual está relacionada a diversos fatores, entre eles a precipitação pluvial, a evapotranspiração, as características do solo, como a capacidade de armazenamento de água, associada à textura do solo, a profundidade, entre outros (LANDERDAHL, 2010).

Em 1948, Thornthwaite desenvolveu um método para estimativa da evapotranspiração potencial (ETP) mensal de um gramado, como um elemento climatológico, visando a classificação climática. Nesse contexto, a ETP é tida como

igual a “chuva ideal”, para que uma região não apresente nem excesso nem deficiência hídrica durante o ano. O equacionamento desenvolvido por Thornthwaite foi baseado em bacias hidrográficas e em medidas realizadas em lisímetros e utiliza apenas a temperatura do ar como variável.

Thornthwaite e Mather (1955) descreveram que o BH climatológico é uma das diversas maneiras de monitorar o armazenamento de água no solo. A partir do fornecimento de água, representado pelas chuvas e o processo da atmosfera, simbolizada pela evapotranspiração potencial, com armazenamento máximo adequado, o BH fornece estimativas do armazenamento de água no solo, evapotranspiração real, deficiência hídrica e do excedente hídrico em diversas escalas de tempo (CAMARGO e CAMARGO, 1993).

O BH climatológico foi desenvolvido inicialmente com o objetivo de caracterizar o clima de uma região, de modo a ser empregado na classificação climática desenvolvida por Thornthwaite na década de 40. Posteriormente, começou a ser empregado para fins agronômicos, dada a grande inter-relação da agricultura com as condições climáticas.

Thornthwaite e Mather (1955) desenvolveram o BH climatológico como uma maneira de monitorar a variação do armazenamento de água no solo. Através da contabilização do suprimento natural de água ao solo, pela precipitação (P), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração potencial (ETP), e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) apropriada ao estudo em questão, o BH fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), podendo ser elaborado desde a escala diária até a mensal (PEREIRA et al., 1997).

Nesse sentido, o BH é uma ferramenta que pode ser utilizada, por exemplo, na identificação de locais favoráveis para determinado tipo de cultura e classificação climática. Cardoso et al. (2003), realizando a simulação de um BH agroclimático para um período de 20 anos na região de Lages/SC, a partir de valores médios de precipitação e evapotranspiração, verificaram, para as condições de CAD iguais a 75 e 100 mm, que a probabilidade de ocorrência de déficits hídricos é muito baixa. Para valores de CAD de 50 mm, os autores encontraram que a probabilidade de não ocorrer déficit hídrico é superior a 50%, na maioria dos decêndios do ano. Para a

condição de CAD igual a 25 mm, a probabilidade de ocorrência de déficits hídricos foi significativamente alta, apresentando magnitudes expressivas, principalmente no verão, o que justificaria a necessidade do uso da irrigação.

Palmer (1965) considera a CAD igual a 100 mm independentemente do tipo de solo em estudo, ou seja, assume que um solo arenoso possui menor capacidade de retenção de água por unidade de volume quando comparado a um solo argiloso. No entanto, nos solos arenosos há um maior aprofundamento do sistema radicular das plantas, resultando em uma capacidade de água disponível semelhante nos dois tipos de solo (BLAIN, 2007). Baseado nessa afirmação, os cálculos de PDSI para o intervalo de tempo em questão, é adotado o limite de 100 mm como capacidade máxima de água disponível no solo, sendo o mesmo dividido em duas camadas, considerando-se 25,4 mm para a camada superior e 74,6 mm para a camada inferior, para todas as localidades do estudo, independentemente do tipo de solo.

Segundo Horikoshi e Fisch (2007), a disponibilidade hídrica pode ser quantificada pelo BH climatológico, por períodos com valores excedente e com deficiência, permitindo um planejamento para as atividades agrícolas, bem como a quantificação das lâminas a serem utilizadas na irrigação. Sendo assim, para definir se uma região apresenta deficiência ou excesso de água durante o ano, é indispensável comparar dois elementos opostos do ciclo hidrológico: a precipitação que aumenta a umidade no solo e a evapotranspiração, que diminui a umidade do mesmo. A evapotranspiração pode ser definida como sendo a transferência de vapor d'água para a atmosfera, proveniente de superfícies com vegetação, incluindo contribuições que seriam a evaporação da umidade existente no substrato, solo ou água, juntamente com a transpiração resultante da atividade biológica das culturas (FREITAS et al., 2013).

Castro et al. (2010) calcularam o BH climático mensal, pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), assumindo uma CAD máxima igual a 100 mm. A evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948), optando-se por este método pela disponibilidade dos dados climáticos e por ter sido desenvolvido para regiões de clima úmido, apresentando boas estimativas para as condições no estado do Espírito Santo.

Além do BH climatológico, é utilizado também o BH para fins de auxílio à tomada de decisão no uso da irrigação, considerada uma prática agrícola, cujo

objetivo é atender as necessidades hídricas das culturas, evitando, assim, que estas sofram deficiências hídricas e, conseqüentemente, reduções em seus rendimentos.

Santana et al. (2004) consideram que os resultados do BH podem ser úteis no processo de zoneamento agroclimático de uma região, a partir do cálculo da demanda potencial de água das culturas irrigadas, com importância no planejamento de pesquisas e conhecimento do regime hídrico.

Gurrapu et al. (2014) compararam o índice SPI e o Índice Padronizado Precipitação-Evapotranspiração (SPEI) em diferentes zonas climáticas do Canadá, com foco nas pradarias canadenses para entender qual dos dois índices representa melhor as condições de seca e os impactos hidrológicos associados. A estimativa da evapotranspiração potencial é um passo crítico no cálculo de SPEI, pois envolve numerosos parâmetros (ALLEN et al., 1998). A Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO) das Nações Unidas adota o método de Penman-Monteith como o procedimento padrão para calcular a evapotranspiração potencial. No entanto, este método requer extensos conjuntos de dados do clima, que são raramente disponíveis e, portanto, dependendo da disponibilidade de dados, a evapotranspiração potencial pode ser estimada, quer usando a temperatura com base no método de Thornthwaite (1948), ou a equação de Penman modificado, método de Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972), entre muitos outros, considerados empíricos. Na presente análise, o método Thornthwaite à base de temperatura e de precipitação foi usado, em função de requerer apenas os dados mensais de temperatura média e a latitude local, que estão prontamente disponíveis na maioria das estações meteorológicas.

3.2.2 Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z)

O índice Z de Palmer representa um termo intermediário no cálculo do PDSI e é considerado uma medida das anomalias de umidade mensal e reflete os desvios das condições de umidade, de um determinado mês, das condições normais de umidade (HEIM JUNIOR, 2002). Este índice considera que o total de precipitação exigida, para manter uma área sob condições econômicas estáveis, depende da média histórica dos elementos meteorológicos e das condições hídricas dos meses

precedentes e do mês considerado, baseado nos princípios do balanço entre o suprimento e a demanda de água no solo.

Conforme Karl (1986), o índice Z reflete as condições hídricas do mês em questão, sem a influência de meses precedentes, podendo indicar um mês úmido em meio a uma seca prolongada. Valores negativos denotam períodos secos e valores positivos do índice Z denotam períodos úmidos.

O índice Z também utilizado por Santos (2008) no estado de Minas Gerais, concluiu que o mesmo, não se mostra eficiente para avaliar a variabilidade produtiva, se empregado sozinho, mostrando que é necessário um estudo mais elaborado, envolvendo outros indicadores meteorológicos.

3.2.3 Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

O SPI foi desenvolvido por McKee et al. (1993) com o objetivo de quantificar, padronizar e comparar a seca, em diferentes bases temporais e espaciais. O SPI tem como vantagem a possibilidade de cálculo em diferentes escalas de tempo e é mais simples do que o PDSI e ainda tem condições de apresentar um panorama da severidade da seca e um aviso prévio de ocorrência dos eventos. Uma desvantagem é que os valores de SPI são baseados em dados preliminares e podem mudar e, além disso, recomenda-se que o tamanho da série de precipitação a ser utilizada seja de no mínimo 30 anos (FERNANDES et al., 2009).

Na análise dos valores encontrados de SPI e da classe de severidade deste índice, considera-se que o evento seca começa quando o SPI torna-se negativo e termina quando este volta a apresentar valores positivos. Assim, os valores dos resultados positivos de SPI mostram precipitação maior que a mediana ou média e os valores negativos demonstram precipitações menores, sendo assim utilizado tanto para climas secos, quanto para clima úmidos (FERNANDES et al., 2009; BLAIN, 2011).

Blain et al. (2010) com o objetivo de averiguar a possibilidade de utilizar o SPI no monitoramento das deficiências e excessos de precipitação, no estado do Espírito Santo, em cinco localidades, concluíram que a principal característica das séries de SPI é a grande variabilidade espaço-temporal, indicando que em uma mesma região, meses extremamente secos podem ser precedidos e seguidos de

meses úmidos ou normais. Além disso, distintos casos de seca podem ocorrer de forma aleatória entre as localidades, em um mesmo período.

Para o município de Taperoá/PB, Farias (2014) aplicou o SPI nas escalas temporais de 3, 6, 9, 12 e 24 meses, para identificar e analisar as secas severas e extremas, utilizando dados de totais mensais precipitados, no período de 1963-2013. Foi observada uma grande variabilidade temporal das séries pluviais utilizadas, com meses extremamente secos, seguidos de meses úmidos ou normais. Os SPI's detectaram, segundo as intensidades, secas severas e extremas no município, embora a categoria de seca moderada tenha acontecido com maior frequência. O autor verificou que o maior número de secas severas e extremas aconteceu durante as décadas de 1980 e 1990, com a maioria delas acontecendo na de 1990.

Silva (2015) objetivou identificar e caracterizar o comportamento da seca utilizando os índices meteorológicos de Moreno e SPI em diferentes escalas temporais (1, 3, 6, 9, 12 e 24 meses), para as estações pluviais localizadas no estado do Rio Grande do Sul. Na análise do SPI, as conclusões obtidas foram: a maior incidência de eventos de seca severa e extrema ocorreu no período de 1943 a 1952, para a mesorregião Nordeste, seguida da Noroeste; as maiores sequências de meses secos ocorreram na classe de severidade de seca extrema e; a maior ocorrência de eventos de seca severa coincidiu em 85%, com os períodos de La Niña, para todas as escalas temporais.

3.3 Influência dos Fenômenos El Niño e La Niña

No Brasil, tanto os fenômenos El Niño quanto La Niña têm provocado alterações climáticas por todo o território e também de maneira bastante heterogênea. De acordo com o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos CPTEC (2011), toda a região Sul do Brasil experimenta precipitação abundante, chuvas intensas e elevações nos níveis de temperatura por decorrência do El Niño; e por manifestações do La Niña, essa mesma região é afetada por secas severas. Em anos de La Niña, com exceção do outono, os níveis médios de precipitação dos municípios desta região são drasticamente reduzidos, o que, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2015), eleva a incidência de estiagens e até mesmo de secas severas. Os níveis médios de temperatura observados revelam

que, comparativamente, eventos La Niña tendem a elevar as temperaturas da região Sul a níveis muito além daqueles registrados nos anos de El Niño (BERLATO e FONTANA, 2003; BERLATO et al., 2005; PORTO, 2005).

O clima é fator decisivo para o desempenho das atividades agrícolas, em que os efeitos do fenômeno El Niño e La Niña vão muito além de serem puramente climáticos e, sem dúvida, acabam também por serem econômicos. Nesse sentido, para entender a vulnerabilidade do setor agrícola a esses fenômenos climáticos, seria de suma importância caracterizá-las quanto a sua vegetação, clima e também produção agrícola.

De acordo como o Ministério do Desenvolvimento Agrário (2012), na região Sul, a produção agrícola extrapola à produção de subsistência, e todo aquele excedente produtivo alcançado é destinado a comercialização e geração de renda. Níveis amenos de temperatura, regime de chuva bem distribuído nas estações do ano e fertilidade dos solos são, dentre outros, os principais fatores que conferem a essa região um desempenho agrícola favorável. Cerca de 70, 50 e 50% da produção nacional de trigo, soja e arroz, respectivamente, são produzidos no Sul do país (IBGE, 2015). Somado a esses percentuais, as lavouras de milho, representam cerca de 90% da produção agrícola desta região.

O estado do Rio grande do Sul possui forte atividade econômica na agricultura, onde os municípios que compõem a região são responsáveis por mais de 20% na produção do país. A produção de grãos na região é muito influenciada pela variabilidade climática, principalmente pela precipitação pluvial e temperatura, que por sua vez são influenciadas pelos fenômenos El Niño e La Niña.

Gross et al. (2012) analisaram alguns municípios do Rio Grande do Sul afetados pela seca, entre os anos de 2000 e 2010 e destacaram que os municípios com economia voltada para o setor agrícola sofreram sérios danos em decorrência da estiagem. Este setor economicamente é o primeiro a ser afetado, pela falta de infraestrutura de irrigação e armazenamento de água para a produção, tendo em vista que o solo mantém a umidade por um determinado período de tempo. Após o prolongamento do déficit de precipitação, o esgotamento da água do solo diminui, por evaporação e/ou infiltração, provocando a escassez de água.

As culturas que são mais vulneráveis à estiagem são as de verão, como o feijão, o milho e a soja e, nas últimas décadas, os registros de perdas em função da estiagem são periódicos, visto que ocorreram e estão ocorrendo em curto espaço de tempo. Para Berlato et al. (2005), que associaram os fenômenos El Niño e La Niña, à variabilidade da precipitação pluvial e a produção de milho no estado do Rio Grande do Sul, encontraram que houve tendência de redução da produtividade média, desde o início do ano de 1920 até a metade do ano de 1940. Nos anos agrícolas de 1942/1943 e 1944/1945, houve forte queda de produtividade, que estaria associada a precipitações pluviais inferiores à média climatológica, registrada por dois eventos de La Niña. A partir do ano de 1960, houve estagnação da produtividade da cultura, ou seja, mais de 20 anos com produtividade média praticamente constante e abaixo da média histórica. É preciso destacar que parte deste período coincidiu com precipitações pluviais que estariam abaixo da média histórica.

As alterações nas condições meteorológicas associadas a esses fenômenos influenciam diversos setores, como a agricultura, a economia, entre outros. A avaliação dos efeitos do El Niño e La Niña sobre o Rio Grande do Sul e a interferência destes sobre a seca pode fornecer subsídios importantes na formulação de estratégias para minimizar os impactos negativos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Classificação do Clima e da Região de Estudo

Segundo a classificação de Köppen, o Rio Grande do Sul se enquadra na zona fundamental temperada ou “C”, isto é, com temperatura do mês mais frio próxima a 3°C, e no tipo fundamental “Cf” - clima temperado úmido, com chuvas distribuídas por todo ano. Como uma subdivisão do tipo fundamental “Cf”, o Estado costuma ser classificado em duas variedades específicas: clima subtropical ou virgiano, “Cfa”, cuja temperatura do mês mais quente é superior a 22°C, e a do mês mais frio oscila entre 3° e 18°C (ALVARES et al., 2013). A região compreendida pelo Estado situa-se no cinturão de latitudes subtropicais, cujo clima apresenta as estações do ano bem definidas, sendo o mês de julho o período regularmente mais frio e típico do inverno. O clima da região apresenta um regime de chuvas uniforme ao longo do ano, sendo determinado basicamente pela passagem regular dos sistemas frontais. Entretanto, entre os meses de maio e setembro, os sistemas meteorológicos sinóticos que atuam na região com maior frequência e intensidade, influenciam mais o regime de chuvas e ocasionam a queda nas temperaturas (CONRADO et al., 2014).

A precipitação pluvial anual média do Rio Grande do Sul é da ordem de 1.540 mm, sendo superior a 1.500 mm na metade norte do Estado e inferior a este valor na metade sul (BERLATO, 1992).

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) subdivide o Estado em 7 mesorregiões geográficas. No entanto, as análises foram realizadas para apenas 5 mesorregiões, visto que existem dados meteorológicos disponíveis apenas para a Centro Ocidental, Metropolitana, Nordeste, Sudeste e Sudoeste.

4.2 Dados Meteorológicos

Foram utilizados dados de temperatura máxima e mínima do ar e de precipitação pluvial de 12 postos meteorológicos do estado do Rio Grande do Sul, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015) e pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2015), sendo que os municípios estudados foram Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul, Iraí, Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre, Santa Maria, Santa Vitória do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana (Figura 1).

Os referidos postos foram utilizados em função dos mesmos apresentarem disponibilidade de informações de temperatura e precipitação com períodos comuns, cujas séries históricas de 53 anos de dados compreenderam o período de 1961 a 2013. Na tabela 1 está a caracterização das 12 estações meteorológicas localizadas em algumas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul, com informações relacionadas ao código, nome, coordenadas geográficas e altitude.

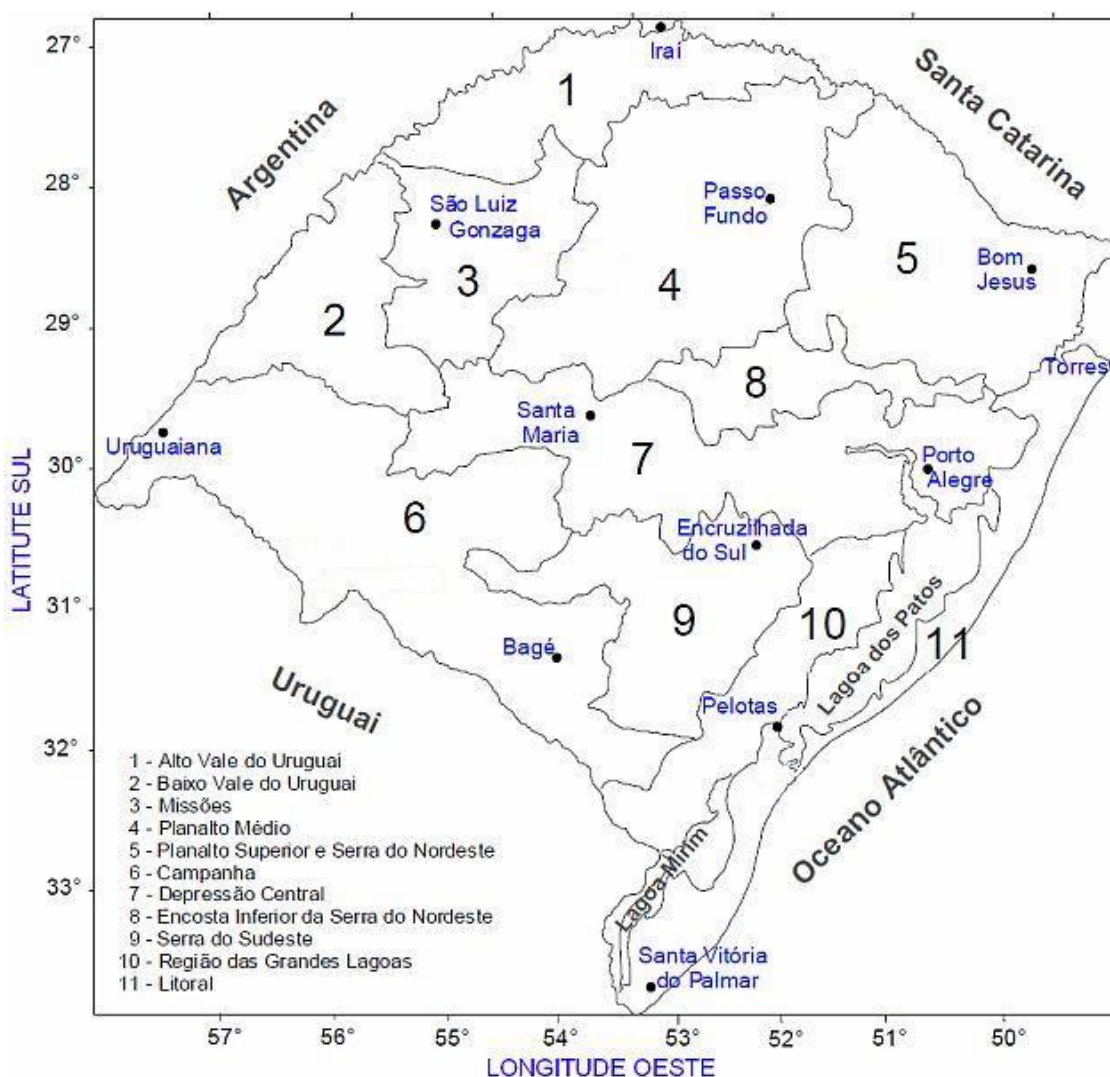


Figura 1- Localização das 12 estações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul. Fonte: ANA (2015)

Tabela 1- Caracterização das 12 estações meteorológicas localizadas em algumas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul

Mesorregião	Estação	Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Centro Ocidental	2953017	Santa Maria	29°43'27"	53°43'12"	95
Metropolitana	3051011	Porto Alegre	30°03'13"	51°10'24"	47
	2949002	Torres	29°20'41"	49°43'41"	31
Nordeste	2850001	Bom Jesus	28°40'07"	50°26'31"	1048
	2852020	Passo Fundo	28°13'33"	52°24'12"	684
	2854011	São Luiz Gonzaga	28°24'00"	54°58'00"	245
	2753003	Iraí	27°11'20"	53°15'12"	247
Sudeste	3152014	Pelotas	31°45'00"	52°21'00"	13
	3353007	Santa Vitória do Palmar	33°31'57"	53°20'58"	24
	3052005	Encruzilhada do Sul	30°32'37"	52°31'25"	428
Sudoeste	3154001	Bagé	31°18'17"	54°07'11"	242
	2957001	Uruguaiana	29°45'00"	57°05'00"	62

Diante das estações analisadas verificou-se que algumas delas apresentavam falhas em seus dados diários de precipitação, cujos valores foram preenchidos utilizando a modelagem estocástica da Cadeia de Markov homogênea de primeira ordem e dois estados (STERN e COE, 1984; PAIVA e CLARKE, 1997). Um maior detalhamento e validação da mesma encontra-se descrito em Silva (2015). Após o preenchimento dos dados faltantes foram constituídas as séries totais mensais de precipitação para cada estação analisada.

Os valores faltantes das séries mensais de temperatura máxima e mínima do ar foram preenchidos com o valor médio do mês em questão, considerando o período de 1961 a 2013.

4.3 Balanço Hídrico Climatológico

O cálculo do balanço hídrico climatológico foi realizado utilizando o método descrito por Thornthwaite (1948) a partir da aplicação das equações (1), (2), (3) e (4), sendo a temperatura média ($T_{\text{média}}$) obtida pela média entre os valores das temperaturas máxima ($T_{\text{máx}}$) e mínima ($T_{\text{mín}}$) de cada localidade, para os períodos de 1961 a 2013.

$$ETP_p = 16 \left(10 \frac{T_{\text{média}}}{I} \right)^a \quad \text{para } T_{\text{média}} > 0^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$T_{\text{média}} = \frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} \quad (2)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot T_{\text{média}})^{1,514} \quad T_{\text{média}} > 0^\circ\text{C} \quad (4)$$

em que,

ETP_p – evapotranspiração potencial mensal (mm);

a – constante que depende do local;

I – índice de calor da região e que deve ser calculado com valores normais (média climatológica);

i – representa o mês do ano.

A fórmula de Thornthwaite estima a ETP_p para uma condição padrão de 12 horas de brilho solar e mês com 30 dias. Para estimar a evapotranspiração potencial mensal (ETP_p , mm), para um mês de ND dias, e fotoperíodo médio mensal (N), há necessidade de se ajustar ETP_p , multiplicando-se os fatores de correções (Equação 5).

$$ETP = ETP_p \frac{N}{12} \frac{ND}{30} \quad (5)$$

em que,

ETP - evapotranspiração potencial (mm).

4.4 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

O PDSI desenvolvido por Palmer (1965) considera que o total de precipitação exigida, para manter uma área sob condições econômicas estáveis, depende da média histórica dos elementos meteorológicos e das condições hídricas dos meses precedentes e do mês considerado. Baseia-se, portanto, nos princípios do balanço entre o suprimento e a demanda de água no solo (balanço hídrico), sendo o solo dividido em duas camadas, uma superior (Ss) e outra sub-superficial (Su). Assim, apenas quando toda água da camada Ss for removida (perda denominada Ls), a camada Su começará a perder água (Lu). Palmer utilizou o balanço hídrico para calcular os valores potenciais de recarga (PR), perda (PL) e o escoamento superficial (PRO) da seguinte forma:

$$PR = CAD - S' \quad (6)$$

$$PL = PL_s + PL_u \quad (7)$$

$$PL_s = \text{Mínimo} [S_s'; ET_0] \quad (8)$$

$$PL_u = (ET_0 - PL_s) \cdot \frac{Su'}{CAD} \quad (9)$$

$$PRO = CAD - PR = S' \quad (10)$$

em que,

PR - recarga potencial (mm);

S' - água armazenada no início do mês em ambas as camadas (mm);

CAD - capacidade de água disponível em ambas as camadas (mm);

PL - perda potencial (mm);

ET_0 - evapotranspiração de referência (mm);

PL_s - perda potencial na camada superficial (mm);

PL_u - perda potencial na camada sub-superficial (mm);

Ss' - água armazenada no início do mês na camada superficial (mm);

Su' - água armazenada no início do mês na camada sub-superficial (mm);

PRO - escoamento superficial potencial (mm).

A recarga (R) no solo assume o valor do parâmetro alteração do armazenamento de água, quando este for positivo, considerando o valor zero para os demais valores. Enquanto a perda (L) assume o valor desse mesmo parâmetro, quando este for negativo.

O escoamento superficial (RO) só ocorre quando a capacidade de retenção de água do solo atingir seu ponto máximo (recarga potencial igual a zero), assumindo, portanto, o valor do excedente no balanço hídrico.

Para calcular os parâmetros “Climaticamente Apropriados às Condições Existentes (CAFEC)” foram considerados os seguintes coeficientes:

Coeficiente de evapotranspiração:

$$\alpha = \frac{\overline{ET_r}}{ET_0} \quad (11)$$

Coeficiente de recarga:

$$\beta = \frac{\overline{R}}{PR} \quad (12)$$

Coeficiente de escoamento:

$$\gamma = \frac{\overline{RO}}{PRO} \quad (13)$$

Coeficiente de perda:

$$\delta = \frac{\bar{L}}{PL} \quad (14)$$

Esses coeficientes são usados para calcular os valores CAFEC de evapotranspiração (\hat{ET}), de recarga (\hat{R}), de escoamento (\hat{RO}), de perda (\hat{L}) e de precipitação (\hat{P}), calculados como segue:

$$\hat{ET} = \alpha \cdot ETo \quad (15)$$

$$\hat{R} = \beta \cdot PR \quad (16)$$

$$\hat{RO} = \gamma \cdot PRO \quad (17)$$

$$\hat{L} = \delta \cdot PL \quad (18)$$

$$\hat{P} = \hat{ET} + \hat{R} + \hat{RO} - \hat{L} \quad (19)$$

Após calcular a precipitação CAFEC (\hat{P}) foi determinada a anomalia hídrica (d'), que contabiliza o excesso ou deficiência com relação à precipitação observada (P).

$$d' = P - \hat{P} \quad (20)$$

Os valores de d' foram convertidos em polegadas para utilização da classificação de Palmer.

$$d' = \frac{d'}{25,4} \quad (21)$$

Para que o índice fosse comparável em diferentes localidades e em qualquer período, Palmer (1965) propôs um fator de ponderação designado pela letra K. Este fator foi baseado em dados climáticos de nove regiões dos Estados Unidos da América e é dado por:

$$K = \frac{17,67 \cdot K'}{\sum_{j=1}^{12} \hat{D}K'} \quad (22)$$

em que,

$$K' = 1,50 \cdot \log_{10} \left[\frac{\left(\frac{\overline{ET_0} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2,80 \right)}{\overline{D}} \right] + 0,50 \quad (23)$$

em que,

\overline{D} - média mensal dos valores absolutos de d' .

O produto entre o fator K de caracterização climática e a anomalia hídrica resulta em um índice de anomalia de umidade (índice Z), padronizado temporalmente e espacialmente.

$$Z = d' \cdot K \quad (24)$$

Valores negativos de Z denotam períodos secos, enquanto valores positivos períodos úmidos. Após calcular o índice Z, Palmer escolheu treze períodos mais secos dessas séries históricas e realizou uma regressão linear simples entre o índice Z acumulado e o número de meses de ocorrência de tais períodos. No caso do presente trabalho foram selecionados um número de períodos maiores ou menores do que os escolhidos por Palmer, de forma a obter um coeficiente de determinação mais próximo possível de 1,0.

O parâmetro responsável pela especificação do grau de severidade de uma seca é o fator de duração (X). As equações de calibração que determinaram o valor de Xi para cada mês foram deduzidas a partir dos intervalos mais secos nas localidades, que compõem as mesorregiões. Foram identificados os intervalos, iguais ou maiores que um mês, que apresentaram valores do índice Z negativos (valores menores ou iguais a -1,5). Em seguida, realizou-se uma regressão linear

entre a soma dos valores acumulados de Z nestes intervalos, e seu respectivo período de duração, obtendo-se uma equação da seguinte forma:

$$\sum Z_i = a \cdot t + b \quad (25)$$

em que,

$\sum Z_i$ - índice Z acumulado no intervalo considerado;

t - número de meses no intervalo considerado.

.

Palmer adotou, também, um valor arbitrário de -4,0 como indicativo de seca extrema, sendo o mesmo igualmente adotado nesse estudo. Assim:

$$X_i = \frac{\sum Z(t)}{(a' \cdot t + b')} \quad (26)$$

Segundo Palmer, em meses sucessivos, uma certa deficiência hídrica será requerida meramente para manter uma mesma severidade de um período seco, pois uma seca extrema não persistirá nessa categoria, se os meses subsequentes forem normais ou próximos do normal. Para estabelecer os intervalos mensais de severidade de seca e, desta forma, definir a contribuição de cada mês para o valor do fator de duração, fez-se $t = 1$ e $i = 1$ na equação (26).

$$X_1 = \frac{Z_1}{(a' + b')} \quad (27)$$

A taxa na qual Z deverá aumentar, para ter uma variação de X constante, depende dos valores precedentes de X. Deste modo, sugere-se que para os meses posteriores ao mês do início de um período seco, deve-se adicionar um termo “c” à equação 27.

$$\Delta X = \frac{Z_i}{(a' + b')} + c \cdot X_{i-1} \quad (28)$$

em que,

$$\Delta X = X_i - X_{i-1} \quad (29)$$

A determinação da constante “c” foi feita com base na equação (27), calculando-se o valor necessário de Z_i para manter um dado valor de X em meses subsequentes, isto é, $\Delta X = 0$. A Tabela 2 apresenta dois valores arbitrários de $X_{i-1} = X_i$ ocorridos em dois determinados meses t .

Tabela 2- Valores arbitrários de t , X_i , X_{i-1} e ΔX , segundo Palmer (1965)

t	X_i	X_{i-1}	ΔX
2	-1	-1	0
10	-1	-1	0
2	-3	-3	0
10	-3	-3	0

Substituindo na equação (26) para os seguintes casos:

a) $X_{i-1} = X_i = -1$; $t_i = 2$ e $t_{i-1} = 1$ tem-se
 $\sum Z_1 = -1 \cdot (a' + b')$ e $\sum Z_2 = -1 \cdot (a' \cdot 2 + b')$
 $\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$

b) $X_{i-1} = X_i = -1$; $t_i = 10$ e $t_{i-1} = 9$ tem-se
 $\sum Z_1 = -1 \cdot (a' \cdot 9 + b')$ e $\sum Z_2 = -1 \cdot (a' \cdot 10 + b')$
 $\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$

c) $X_{i-1} = X_i = -3$; $t_i = 2$ e $t_{i-1} = 1$ tem-se
 $\sum Z_1 = -3 \cdot (a' + b')$ e $\sum Z_2 = -3 \cdot (a' \cdot 2 + b')$
 $\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$

d) $X_{i-1} = X_i = -3$; $t_i = 10$ e $t_{i-1} = 9$ tem-se
 $\sum Z_1 = -3 \cdot (a' \cdot 9 + b')$ e $\sum Z_2 = -3 \cdot (a' \cdot 10 + b')$
 $\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$

em que,

ΔZ - valor necessário para manter uma dada severidade de seca em meses subsequentes, ou seja, o decréscimo que o índice Z deve apresentar para que uma dada severidade ($X_{i-1} = X_i$) seja mantida.

Por fim, os valores de ΔZ foram aplicados na equação (28) para determinar o valor de “c”, resultando no cálculo do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI). A Tabela 3 apresenta as categorias de classificação do PDSI, considerando os períodos úmidos e secos. No presente trabalho foram utilizados apenas as classificações dos índices de intensidade relacionados ao período seco, em função do objetivo do mesmo, e específico às secas severas e extremas, por causarem maiores danos à produção agrícola.

Tabela 3- Classificação da intensidade da umidade e da seca, de acordo com o Índice de Severidade de Palmer (PDSI) (PALMER, 1965)

PDSI	Categoria
$\geq 4,00$	Extremamente Úmido
3,00 a 3,99	Umidade Alta
2,00 a 2,99	Umidade Moderada
1,00 a 1,99	Umidade Baixa
0,50 a 0,99	Umidade Inicial
0,49 a -0,49	Normal
-0,50 a -0,99	Seca Inicial
-1,00 a -1,99	Seca Suave
-2,00 a -2,99	Seca Moderada
-3,00 a -3,99	Seca Severa
$\leq -4,00$	Seca Extrema

4.5 Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z)

O Z-index (Z) é denominado também de Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (DUNKEL, 2009) e os procedimentos para o cálculo são os mesmos do PDSI, descritos anteriormente (Item 4.4). A Tabela 4 apresenta a classificação do

índice, quanto às intensidades de umidade e seca, de acordo com Fernandes et al. (2010).

Tabela 4- Classificação da intensidade da umidade e da seca, de acordo com o Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z) (FERNANDES et al., 2010)

Índice Z	Categoria
$\geq 4,00$	Extremamente Úmido
3,00 a 3,99	Umidade Alta
2,00 a 2,99	Umidade Moderada
1,00 a 1,99	Umidade Baixa
0,50 a 0,99	Umidade Inicial
0,49 a -0,49	Normal
-0,50 a -0,99	Seca Inicial
-1,00 a -1,99	Seca Suave
-2,00 a -2,99	Seca Moderada
-3,00 a -3,99	Seca Severa
$\leq -4,00$	Seca Extrema

4.6 Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

O SPI foi calculado para a escala temporal mensal de acordo com o método desenvolvido por McKee et al. (1993). A partir das séries históricas mensais de precipitação foram determinadas as probabilidades acumuladas de ocorrência de precipitação por meio da distribuição Gama de dois parâmetros (ULIANA et al., 2015). Os parâmetros de forma e de escala foram obtidos pelo método da máxima verossimilhança (THOM, 1966).

Como a função Gama é indefinida para valores de $x = 0$ e a amostra de dados de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa foi calculada utilizando a equação:

$$H(x) = q + (1 - q) \cdot G(x) \quad (30)$$

em que,

$H(x)$ - distribuição de probabilidade cumulativa;

q - probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros);

$G(x)$ - distribuição cumulativa teórica. Se m é o número de zeros em uma série temporal de precipitação, Thom (1966) indica que q pode ser estimado por $m/n + 1$.

A distribuição de probabilidade cumulativa $H(x)$ é transformada em uma variável aleatória normalizada (Z), com média zero e desvio padrão 1, onde a variável (Z) corresponde ao valor de SPI. O valor de (Z) ou SPI pode ser obtido pela aproximação matemática desenvolvida por Abramowitz e Stegun (1965), que converte a probabilidade cumulativa em uma distribuição normal, em que Z é definido pelas equações (31) e (32).

$$Z = \text{SPI} = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (31)$$

$$Z = \text{SPI} = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3} \right) \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1,0 \quad (32)$$

Sendo t definido pelas equações (33) e (34).

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (33)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0,5 < H(x) \leq 1,0 \quad (34)$$

Os coeficientes utilizados nas equações (30) e (31) foram: $C_0 = 2,515517$; $C_1 = 0,802853$; $C_3 = 0,010328$; $d_1 = 1,432788$; $d_2 = 0,189269$; $d_3 = 0,001308$ (ABRAMOWITZ e STEGUN, 1965).

Após a determinação dos valores de SPI, para cada estação na escala temporal, foi utilizada a Tabela 5 para a classificação dos valores quanto à severidade da seca (FERNANDES et al., 2010).

Tabela 5- Classificação do excesso e déficit de acordo com o Índice Padronizado da Precipitação (SPI) (FERNANDES et al., 2010)

SPI	Categoria
$\geq 2,00$	Extremamente Úmido
1,00 a 1,99	Umidade Alta
0,50 a 0,99	Umidade Moderada
-	Umidade Baixa
0,49 a 0,49	Umidade Inicial
-	Normal
-0,50 a -0,99	Seca Inicial
-	Seca Suave
-0,50 a -0,99	Seca Moderada
-1,00 a -1,99	Seca Severa
$\leq -2,00$	Seca Extrema

O evento “seca” inicia-se quando o SPI torna-se negativo e termina quando este torna-se positivo. Dentro de sua escala o valor limite igual ou inferior a $-2,0$ indica “seca extrema” e o valor superior ou igual a $+2,0$ indica “umidade extrema”.

Todos os cálculos que permitiram a determinação dos três índices analisados, inclusive os relacionados aos balanços hídricos climatológicos, conforme Thornthwaite (1948), foram realizados através de planilhas eletrônicas.

4.7 Comparação entre os Índices Agrícolas e Meteorológico

Os valores obtidos por meio dos índices de seca (PDSI, Índice Z e SPI) foram analisados utilizando-se o número de eventos de seca em escala anual e mensal e a sequência relativa dos mesmos. Além disso foram realizadas correlações entre o SPI versus PDSI e SPI versus Índice Z, para todas as localidades, em função das classificações apresentadas nas Tabelas 3, 4 e 5, considerando-se apenas as intensidades de seca severa e extrema.

Para avaliar a correlação entre os valores de seca obtidos pelos índices foi utilizado o teste t (*t-Student*), analisando-se a significância do coeficiente angular do modelo de regressão linear simples ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$), entre o SPI versus PDSI e SPI

versus Índice Z. Foi testado o resultado do coeficiente angular da regressão, definindo se o mesmo é nulo ou diferente de zero (se existir regressão o coeficiente angular será diferente de zero). As hipóteses testadas foram $H_0: \beta_1 = 0$ e $H_1: \beta_1 \neq 0$, em que o coeficiente de regressão será significativo, ou seja, $\beta_1 \neq 0$, quando $t_{\text{calculado}}$ for maior do que t_{tabelado} , para $n - 2$, graus de liberdade. Nesse caso, para um nível α de probabilidade, rejeita-se a hipótese de nulidade, podendo-se afirmar que o coeficiente angular da reta é diferente de zero, ou seja, há associação entre as variáveis, não havendo diferença estatística entre os índices testados, quanto aos eventos de seca.

No presente trabalho foi considerado como variável dependente, o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e como variáveis independentes o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e o Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), para um nível α de probabilidade de 5% de erro.

5 Resultados e Discussão

5.1 Caracterização do Regime Pluvial das Localidades Analisadas

Na figura 2 é apresentado o comportamento da precipitação média mensal das localidades analisadas, pertencentes ao estado do Rio Grande do Sul, no período de 1961-2013, bem como o valor médio das mesmas.

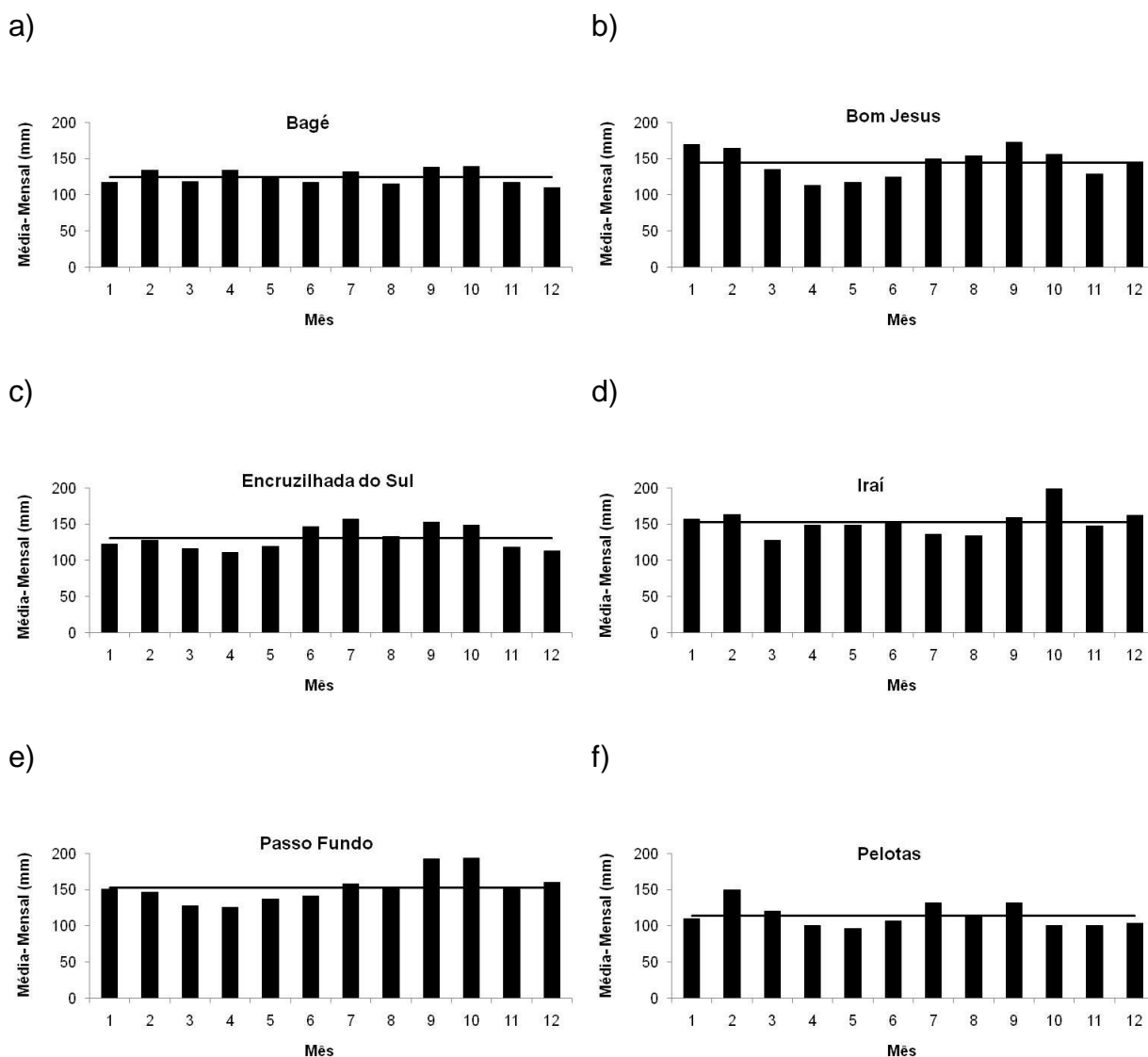
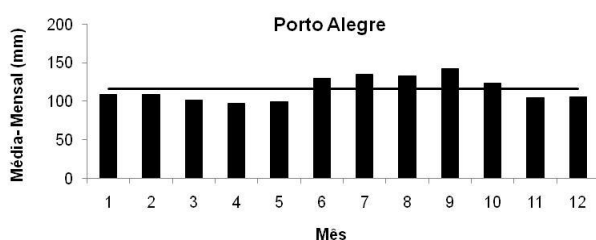
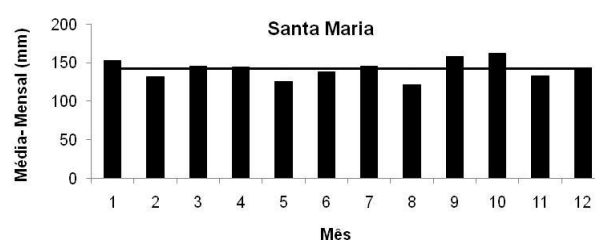


Figura 2- Médias mensais das precipitações (mm), no período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul, Iraí, Passo Fundo e Pelotas

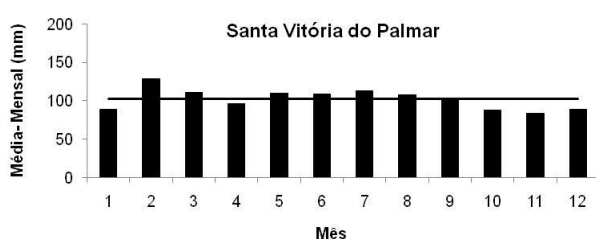
a)



b)



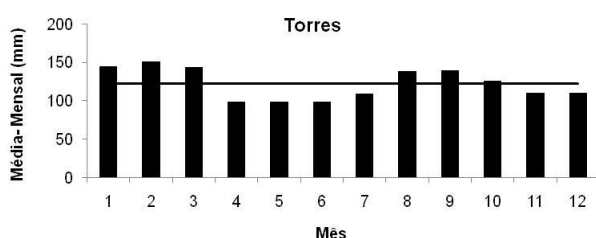
c)



d)



e)



f)

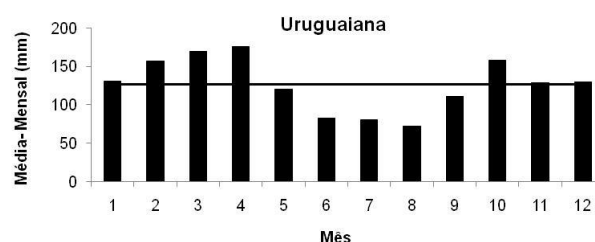


Figura 3- Médias mensais das precipitações (mm), no período de 1961 a 2013, para as localidades de Porto Alegre, Santa Maria, Santa Vitória do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiiana

Analisando-se as médias dos valores de precipitação das respectivas localidades, observa-se que as mesmas apresentam uma variabilidade no regime pluvial, como por exemplo, no município de Uruguaiiana, que apresentou uma amplitude maior de precipitação média mensal, cujos valores variaram de 81,2 (agosto) a 175,8 mm (abril) (Figura 3f). Em Iraí verifica-se que o maior valor médio ocorreu em outubro (199,0 mm) e o menor (122,2 mm) em março, mostrando que não há uma grande disparidades dos mesmos em relação à média total anual (153,4 mm). Com relação aos demais municípios, as médias totais anuais foram 125,1 mm (Bagé), 144,3 mm (Bom Jesus), 130,7 mm (Encruzilhada do Sul), 153,4 mm (Iraí), 153,3 mm (Passo Fundo), 113,8 mm (Pelotas), 116,0 mm (Porto Alegre), 142,2 mm

(Santa Maria), 102,5 mm (Santa Vitória do Palmar), 157,5 mm (São Luiz Gonzaga), 122,4 (Torres) e 126,6 mm (Uruguaiana). Os municípios que forneceram os menores valores de lâmina média total anual foram Pelotas (113,8 mm), Porto Alegre (116,0 mm) e Santa Vitória do Palmar (102,5 mm).

Na análise da variação climatológica mensal da precipitação nas localidades em estudo, verifica-se que os meses de verão, novembro e dezembro foram os mais secos na maioria das localidades. Porém pode ser observado que na localidade de Uruguaiana, cujos valores de precipitação nos meses de junho, julho e agosto, pertencentes à estação chuvosa, foram 82,8; 81,2 e 72,7 mm, respectivamente, ficaram abaixo da média geral (126,6 mm).

Moraes et al. (2005) analisaram a variação anual da precipitação com base nas séries históricas de 23 anos (1976-1998), para 31 localidades no estado do Pará, com foco no planejamento das atividades agrícolas. A variação sazonal da precipitação foi caracterizada por uma estação chuvosa, que na maioria das localidades compreende os meses de dezembro a maio, correspondente ao primeiro mês em que a precipitação normal é igual ou maior que a metade da evapotranspiração potencial, e por uma estação menos chuvosa (estação seca), que corresponde, geralmente, ao período de junho a novembro. Os autores verificaram que dezembro é o mês que caracteriza o início da estação chuvosa na maioria das localidades do estado analisado.

Na análise de Matzenauer (2005) que observou, em algumas regiões da metade norte do estado do Rio Grande do Sul, que o volume de chuvas ultrapassaram 1900 mm anuais, enquanto que na metade sul, algumas regiões apresentaram volumes inferiores a 1400 mm anuais, caracterizando, portanto, uma variabilidade significativa. Apesar da variabilidade observada no RS, a distribuição da precipitação nas quatro estações do ano é bastante uniforme, apresentando, em média, 24% no verão, 25% no outono, 25% no inverno e 26% na primavera (BERLATO, 1992).

Silva (2006) analisando os dados mensais de precipitação pluvial nas localidades situadas a nordeste do estado de Goiás, nos municípios de Campo Alegre, Nova Roma e São Domingos, observaram um menor índice pluvial. Já nos municípios de Arenópolis, Campinaçu, Pilar de Goiás e Piracanjuba apresentaram no mês de janeiro o maior índice pluvial (282 mm). Os valores de umidade relativa

do ar foram menores nas regiões em que chove menos, enquanto os valores maiores foram observados nas localidades onde a precipitação pluvial é maior. Os autores afirmaram ainda que nos municípios que apresentaram valores altos de evaporação e baixos índices pluviais produziram, conseqüentemente, um maior déficit hídrico. Este fato pode ser comprovado, principalmente, nos municípios situados a nordeste do estado.

De acordo com Boshi et al. (2011), que analisaram o período mais problemático do calendário agrícola do Rio Grande do Sul, concluíram que o verão é o mais crítico por coincidir com o período em que as principais culturas, desta estação, estão na fase de floração e enchimento de grãos, com a maior necessidade de água e máxima sensibilidade ao déficit hídrico. No período que compreende a primavera e o verão, o Estado apresenta grande demanda evaporativa da atmosfera e, por conseguinte, sofre regularmente de carências hídricas, mesmo em períodos climatológicos normais.

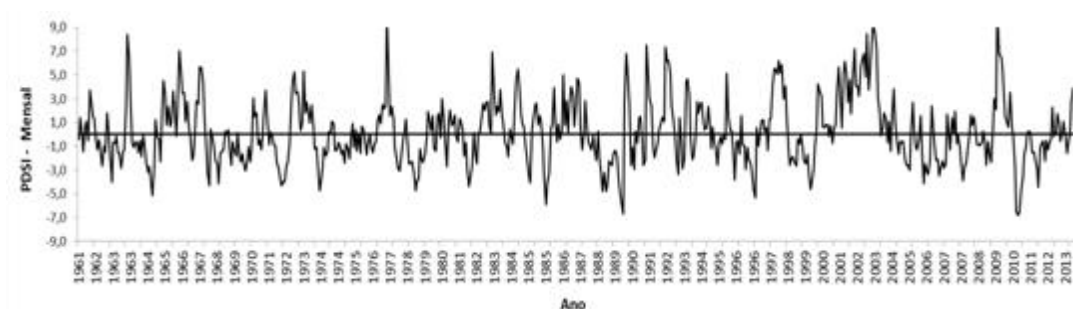
Ferreira e Nery (1999) objetivando analisar a distribuição da precipitação pluvial no RS, utilizando dados mensais de 29 estações meteorológicas para o período de 1948 a 1988, concluíram que existe uma maior concentração da precipitação pluvial nas regiões oeste e nordeste do Estado e uma menor concentração, na região noroeste e na região do rio Guaíba.

As alterações climáticas que vêm ocorrendo nos últimos anos, têm influência nos regimes de chuva da região sul, que contribuem para a redução da quantidade e da qualidade da água. Embora no Rio Grande do Sul existam grandes reservas hídricas, os processos de utilização, decorrentes das atividades públicas ou privadas (agrícolas, industriais, energéticas) têm contribuído para a sua exaustão e degradação, de forma sistemática (EMATER, 2005).

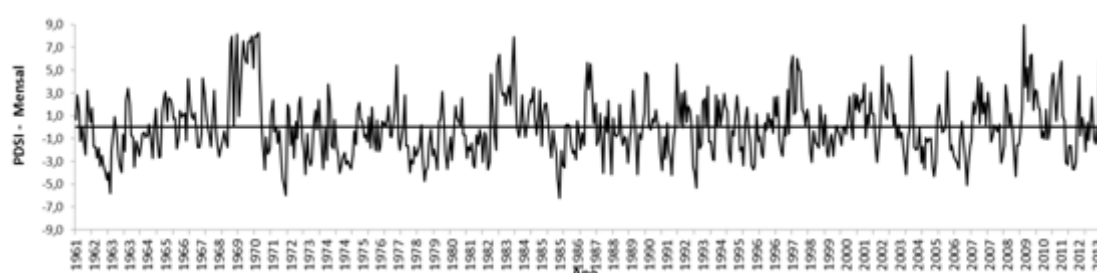
5.2 Comportamento das Séries Temporais com Base nos Resultados do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

Nas figuras 4, 5 e 6 encontra-se o comportamento das séries temporais do PDSI, no período de 1961 a 2013, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul.

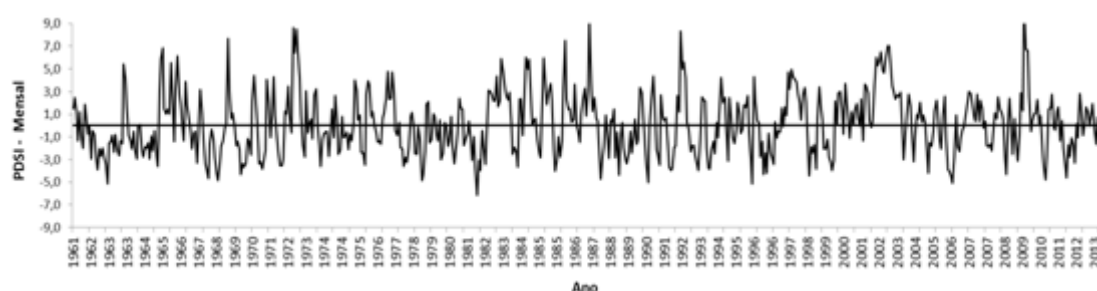
a) Bagé



b) Bom Jesus



c) Encruzilhada do Sul



d) Iraí

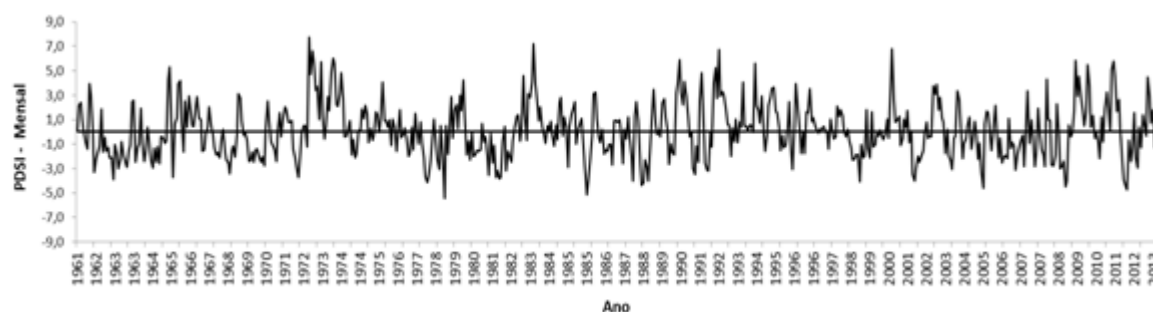
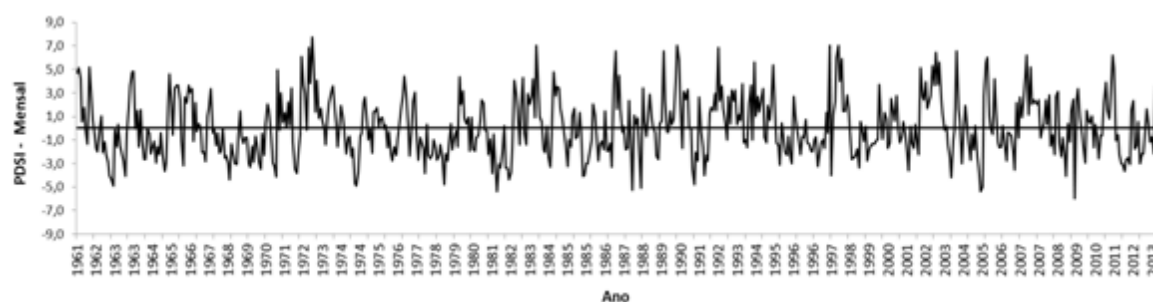
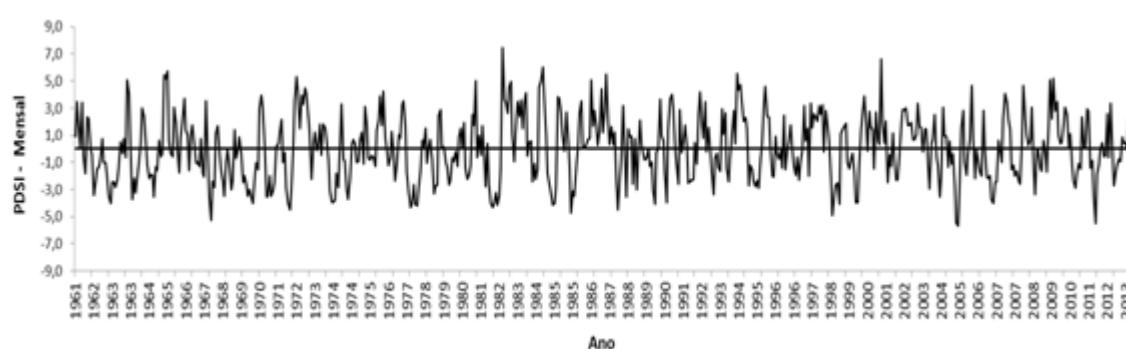


Figura 4- Comportamento dos valores mensais do Índice de Seca de Palmer (PDSI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul e Iraí

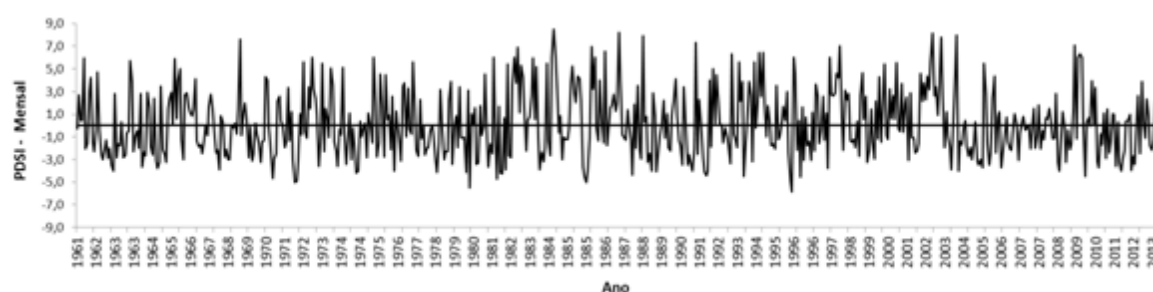
a) Passo Fundo



b) Pelotas



c) Porto Alegre



d) Santa Maria

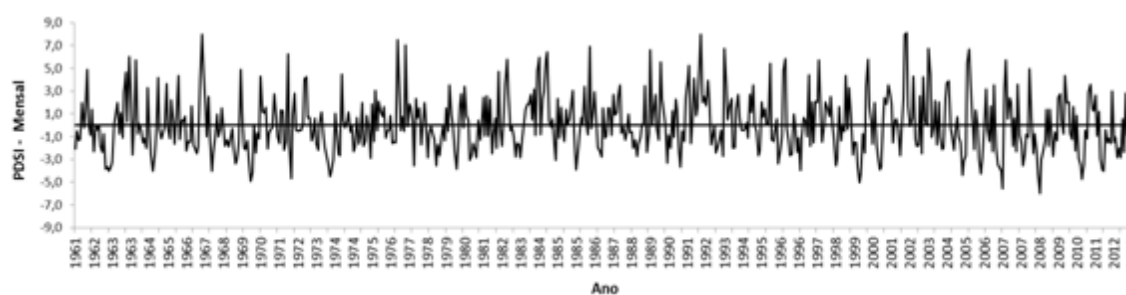
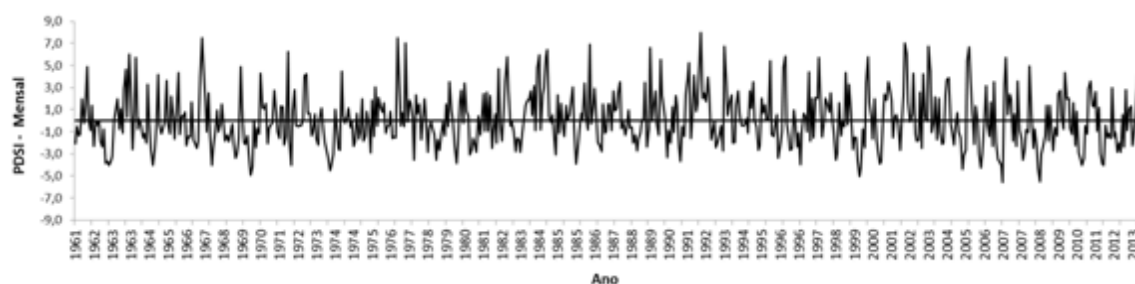
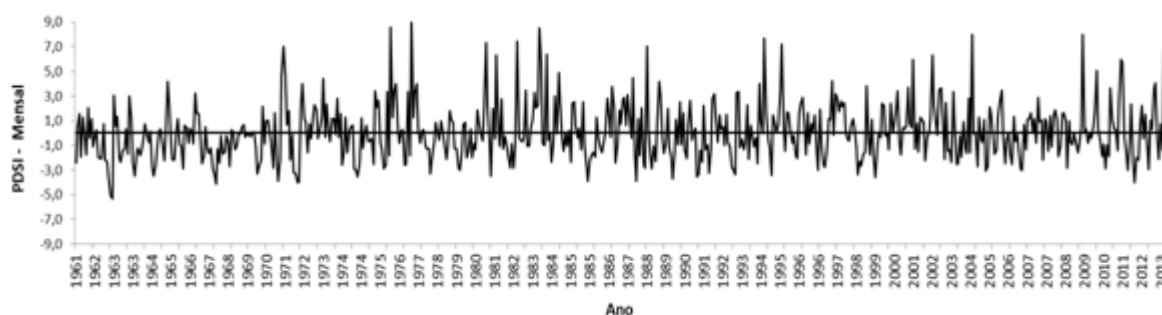


Figura 5- Comportamento dos valores mensais do Índice de Seca de Palmer (PDSI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria

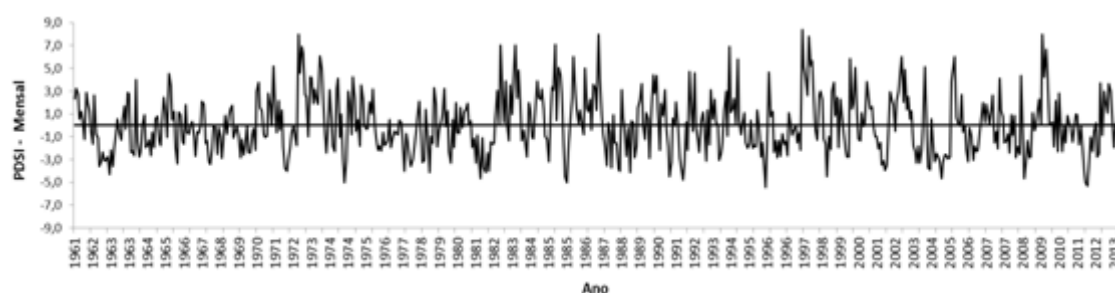
a) Santa Vitória do Palmar



b) São Luiz Gonzaga



c) Torres



d) Uruguaiana

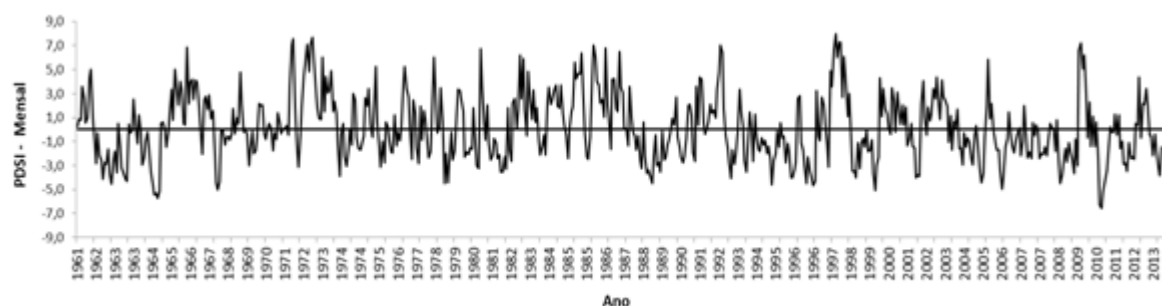


Figura 6- Comportamento dos valores mensais do Índice de Seca de Palmer (PDSI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Santa Vitoria do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana.

A evolução das séries temporais dos valores do PDSI calculados permitiu observar os períodos que vão desde a seca extrema até o extremamente úmido. Observam-se, também, períodos com seca moderada e próximos daquelas classificadas como normal.

No cálculo do PDSI há dependência do índice relativo ao mês anterior, o que permite que essa defasagem resulte em baixa sensibilidade do mesmo em considerar os efeitos de um mês com precipitação próxima, porém inferior à média mensal histórica, caso o mês anterior tenha apresentado excedente significativo nos valores de precipitação. Essa defasagem também foi observada por Mckee et al. (1993), em razão da exagerada “memória” que o índice carrega, indicando tendência de aumento do número de eventos de seca.

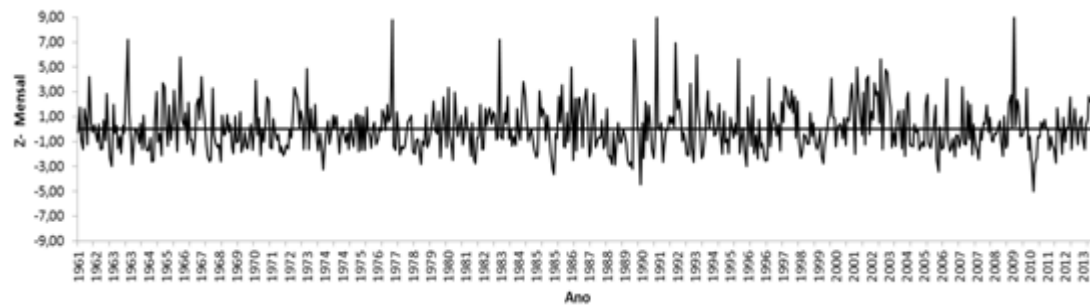
Os resultados encontrados por Barra et al. (2002), para o estado do Ceará, permitiram analisar a ocorrência de seca e do seu grau de severidade, sendo as secas moderadas e severas as mais frequentes, excetuando-se as localidades das microrregiões serranas. Os autores concluíram que a variação da severidade das secas pode ser caracterizada pelo PDSI, mostrando a sua utilidade na estimativa dos impactos das secas no Estado, o que não seria possível apenas com a análise dos dados de precipitação.

Blain et al. (2007), por meio de mudanças e adaptações na equação original do índice PDSI relacionaram o início e fim de um evento de seca em função da razão entre evapotranspiração real e potencial. Assim, obtiveram bons resultados na quantificação de secas para o estado de São Paulo.

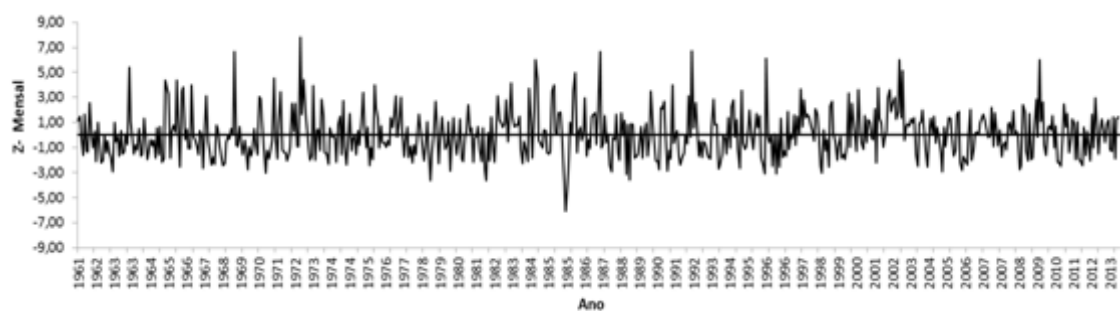
5.3 Comportamento das Séries Temporais com Base nos Resultados do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z)

Na análise da evolução das séries temporais (Figuras 7, 8 e 9) do índice Z observou-se uma menor ocorrência de secas severas e extremas, em relação ao índice PDSI (Figuras 4, 5 e 6). Apesar do índice Z ser calculado com os mesmos parâmetros do PDSI, o mesmo não leva em consideração as condições de umidade mensais anteriores e, conseqüentemente, responde de forma rápida às mudanças de umidade.

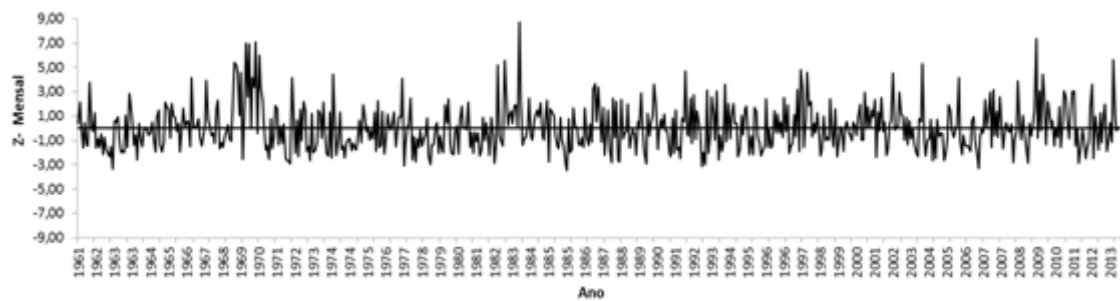
a) Bagé



b) Bom Jesus



c) Encruzilhada do Sul



d) Iraí

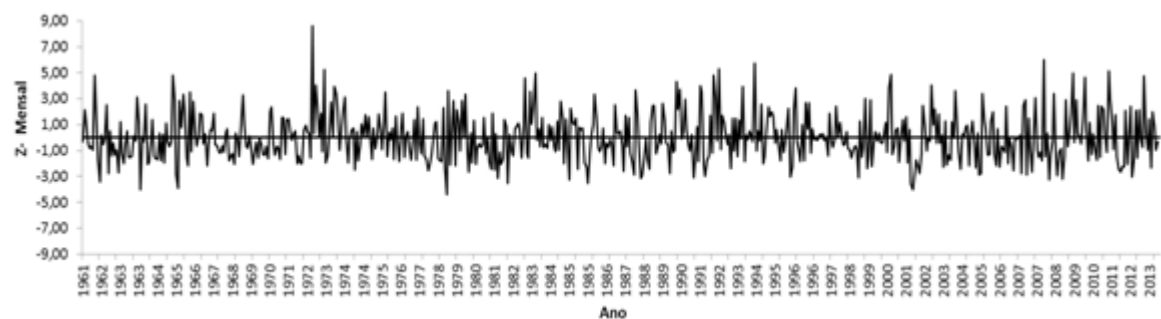
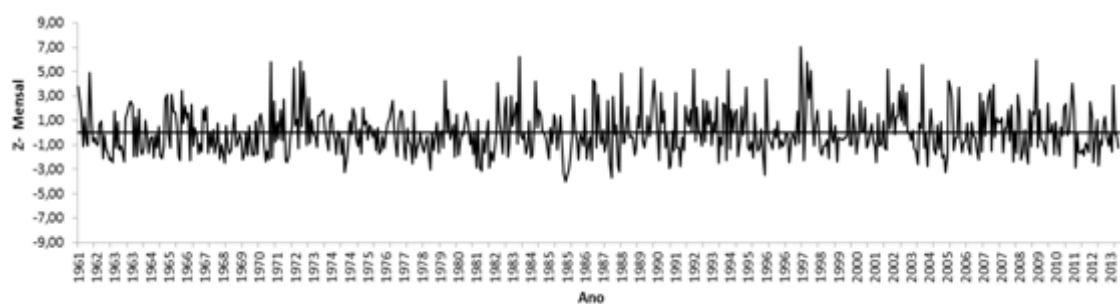
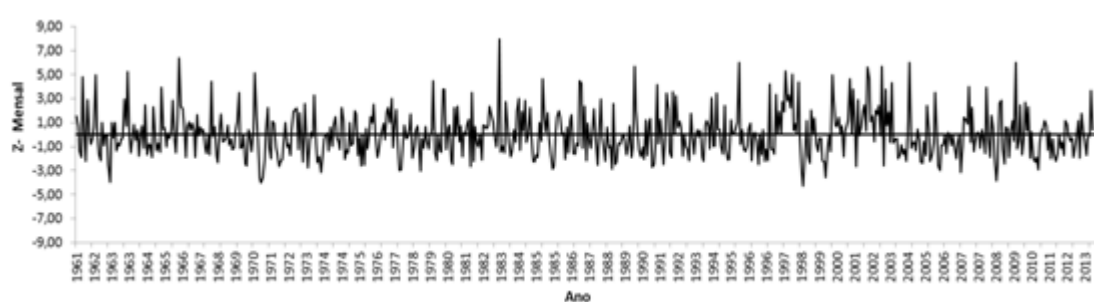


Figura 7- Comportamento dos valores mensais do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul e Iraí

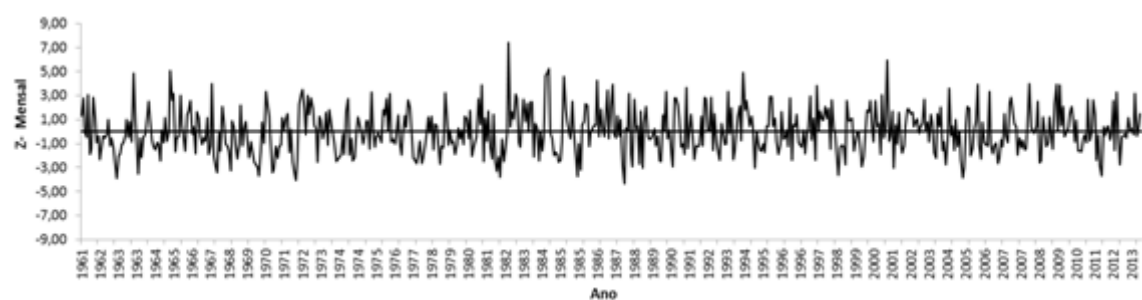
a) Passo Fundo



b) Pelotas



c) Porto Alegre



d) Santa Maria

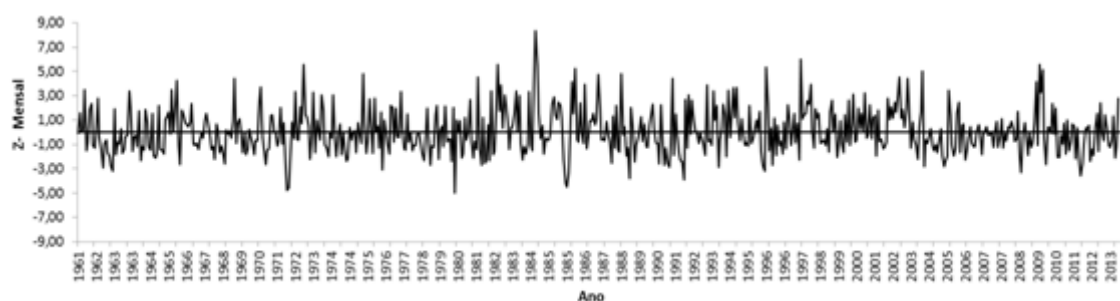
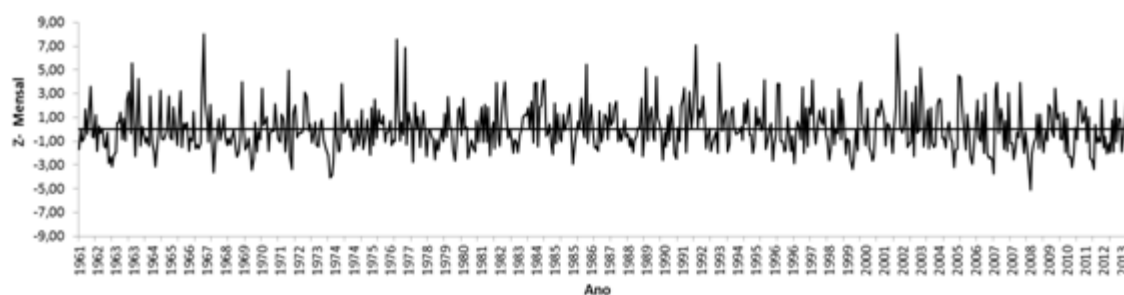
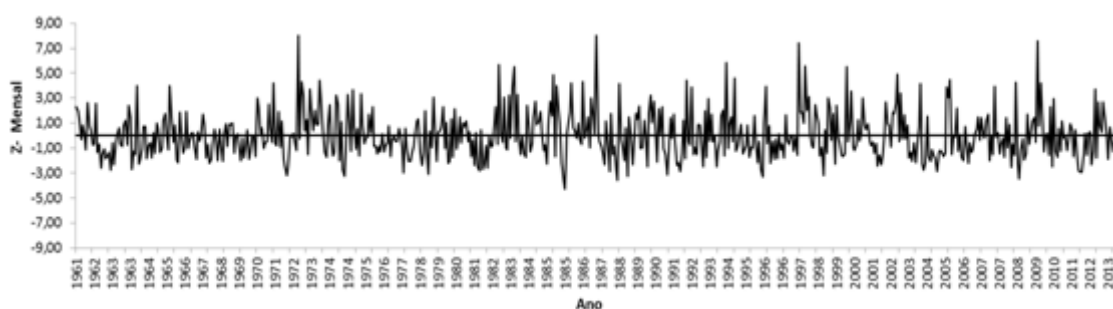


Figura 8- Comportamento dos valores mensais do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria

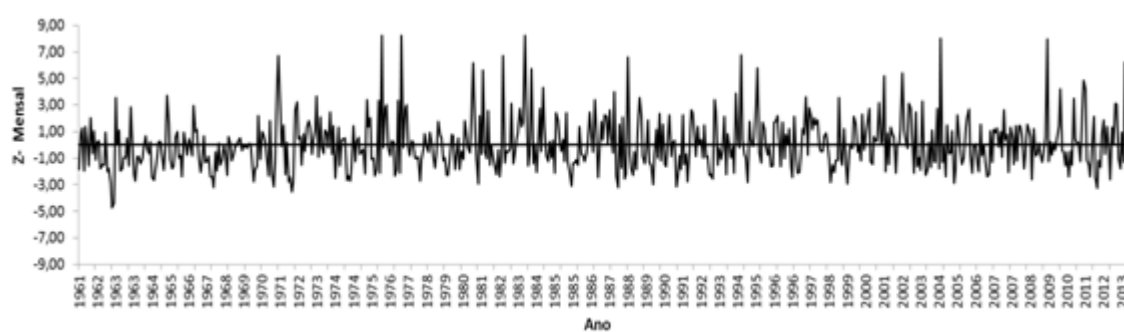
a) Santa Vitória do Palmar



b) São Luiz Gonzaga



c) Torres



d) Uruguaiana

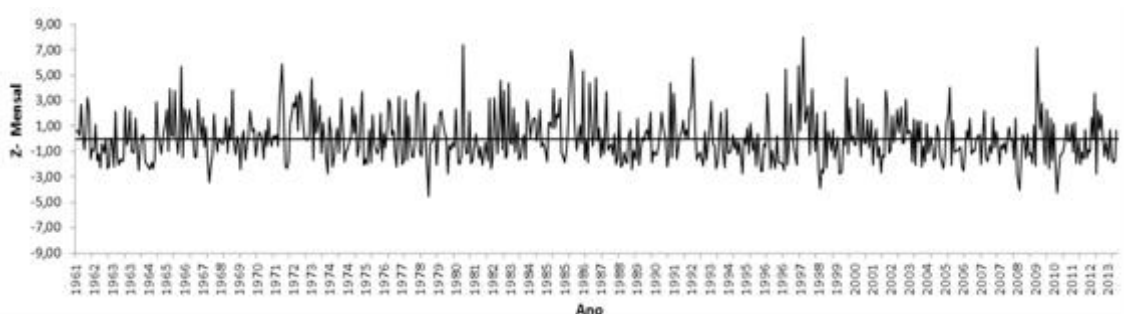


Figura 9- Comportamento dos valores mensais do Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Santa Vitória, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana

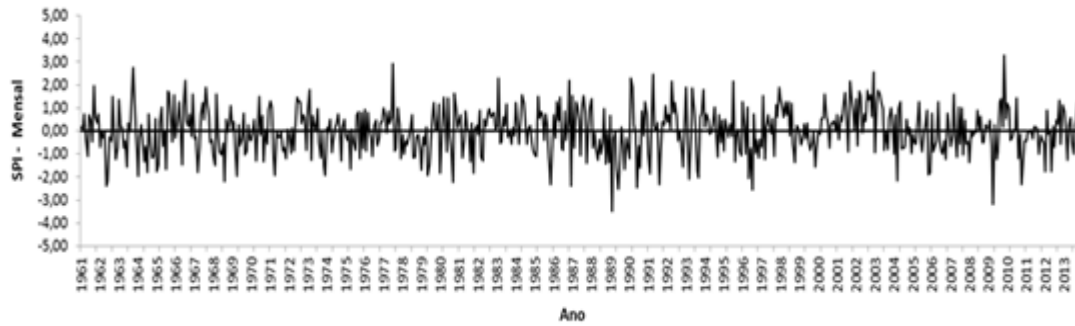
Fernandes et al. (2010) analisaram índices de seca agrícola e meteorológico para o município de Santo Antônio de Goiás/GO, no período de 1983 a 2008, em que os resultados permitiram observar que o índice Z mostrou maior ocorrência de eventos de seca, em comparação ao PDSI. Esse índice estimou períodos extremamente secos em 3 anos, muito secos em 7 anos, moderadamente secos em 14 anos e pouco secos em 26 anos. Foram observados 134 meses com ocorrência de eventos de seca estimados pelo Z, dos quais 3 meses foram classificados como extremamente secos, 8 meses como muito secos, 30 meses como moderadamente secos e 93 meses considerados pouco secos. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que o índice Z obteve o melhor desempenho para a região analisada.

5.4 Comportamento das Séries Temporais com Base nos Resultados do Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

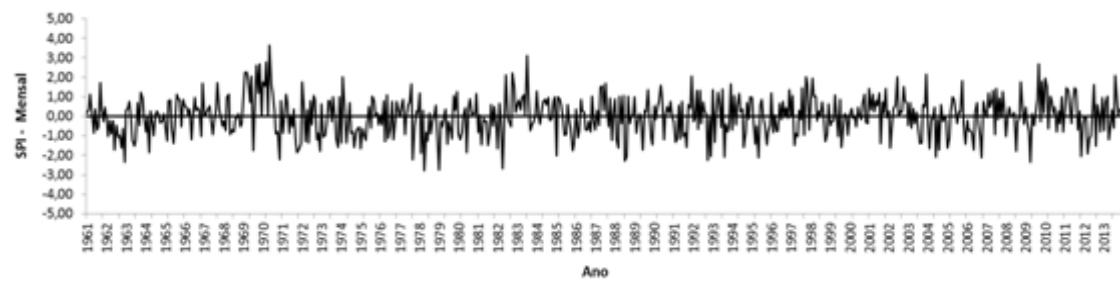
Na avaliação das séries temporais mensais do índice SPI (Figuras 10,11 e 12), no período de 1961 a 2013, observou-se períodos que variaram do extremamente úmido a seca extrema. Na comparação do índice SPI em relação aos índices PDSI e o Z, observou-se que o SPI teve maior proximidade do PDSI, quanto as severidades de seca severa e extrema. Deve-se salientar que o SPI não considera os grupos de pouca seca/umidade, pela sua classificação, ocasionando uma maior concentração no grupo normal. Índices que utilizam na sua formulação a distribuição normal são mais desejáveis, pois permitem, com maior facilidade, comparações em diferentes localidades (DOMINGOS, 2006).

Na análise de eventos de seca ocorridos no estado da Bahia, Silva et al. (2013) selecionaram 11 estações pluviométricas nas diferentes regiões climáticas, sendo duas localizadas no estado de Minas Gerais. Os resultados indicaram que os principais eventos de seca foram observados nas décadas de 1950, 1960 e 1990, sendo que o mais abrangente foi o ocorrido em torno de 1953 e, em maior intensidade, os eventos de seca de 1963 e 1998. Em relação ao período mais recente, 2010 a 2012, foram observados valores negativos do SPI, ou seja, eventos de seca nas estações localizadas nas regiões de Itajuípe e Conceição da Barra, e na Chapada Diamantina.

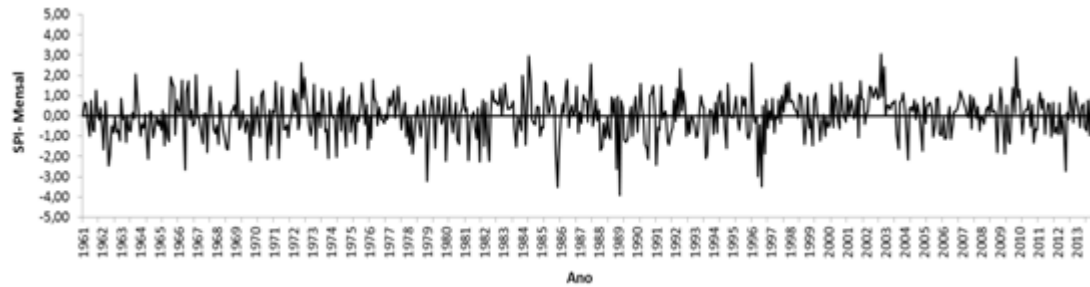
a) Bagé



b) Bom Jesus



c) Encruzilhada do Sul



d) Iraí

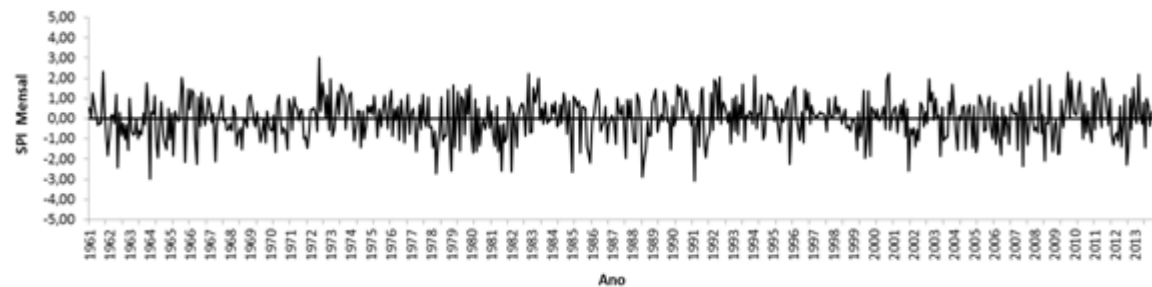
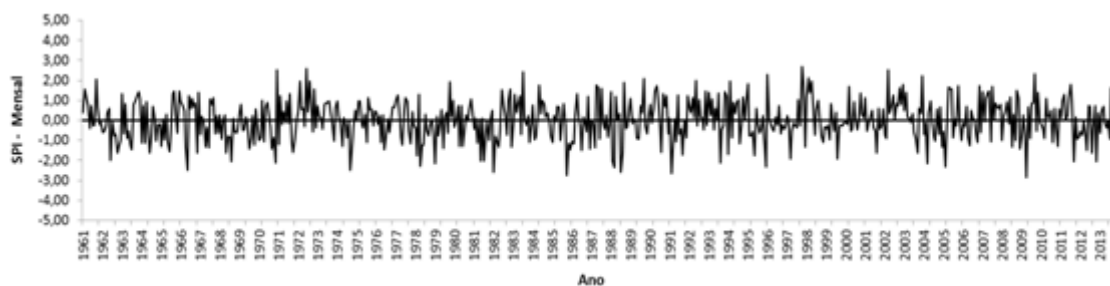
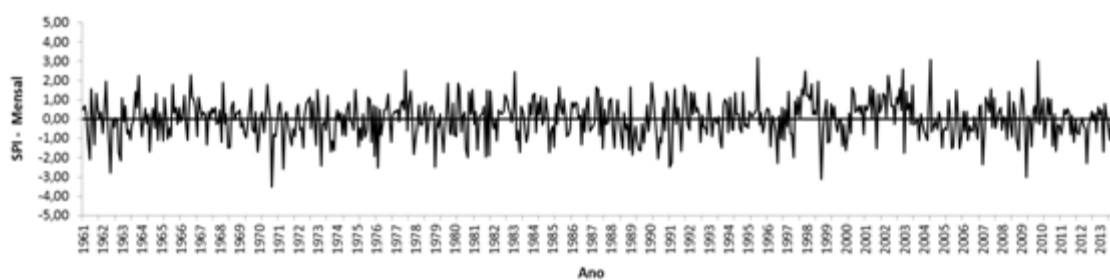


Figura 10- Comportamento dos valores mensais do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul e Iraí

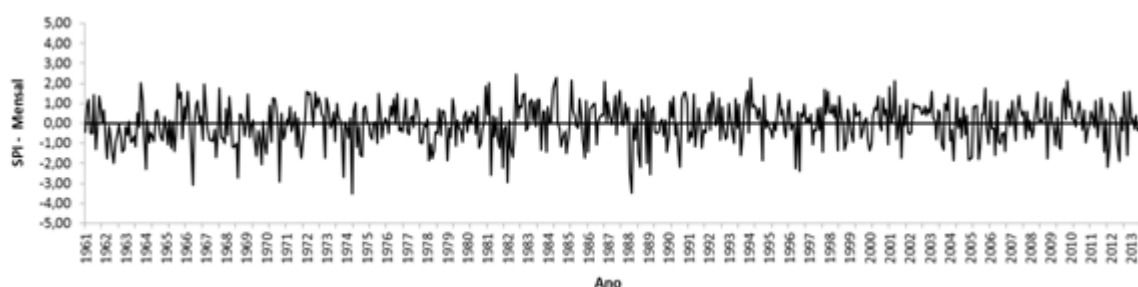
a) Passo Fundo



b) Pelotas



c) Porto Alegre



d) Santa Maria

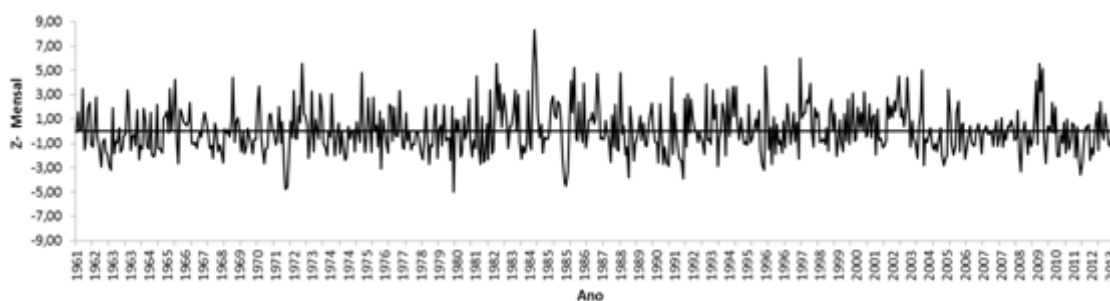
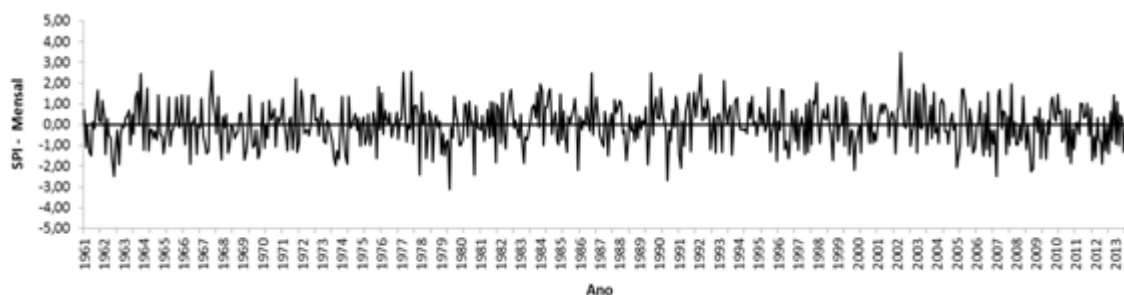
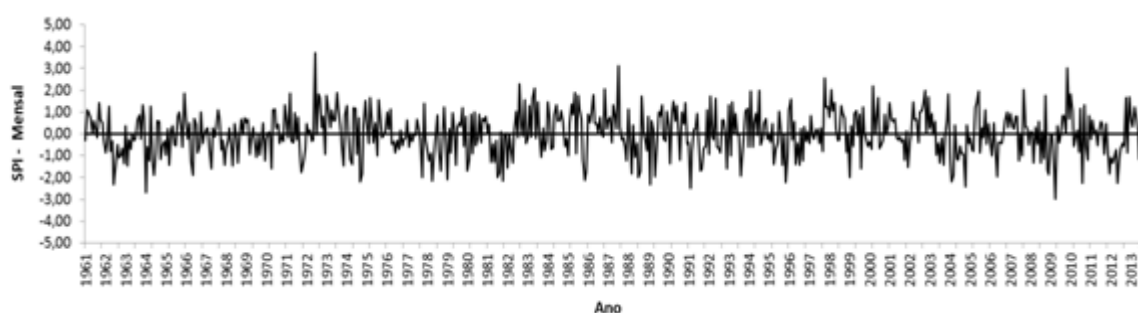


Figura 11- Comportamento dos valores mensais do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), para o período de 1961 a 2013, nas localidades de Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria

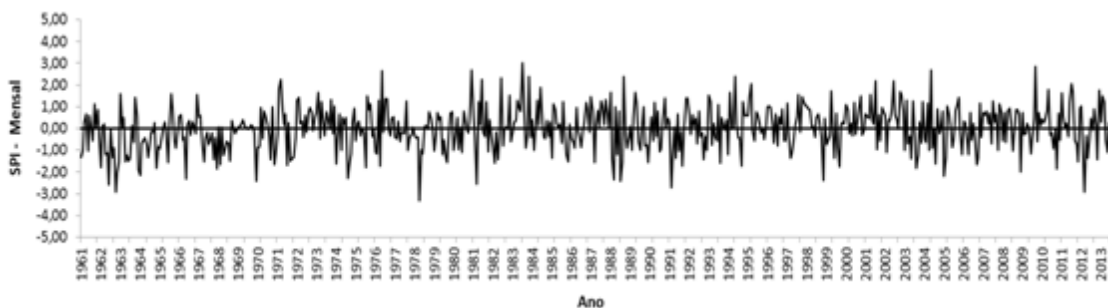
a) Santa Vitória do Palmar



b) São Luiz Gonzaga



c) Torres



d) Uruguaiana

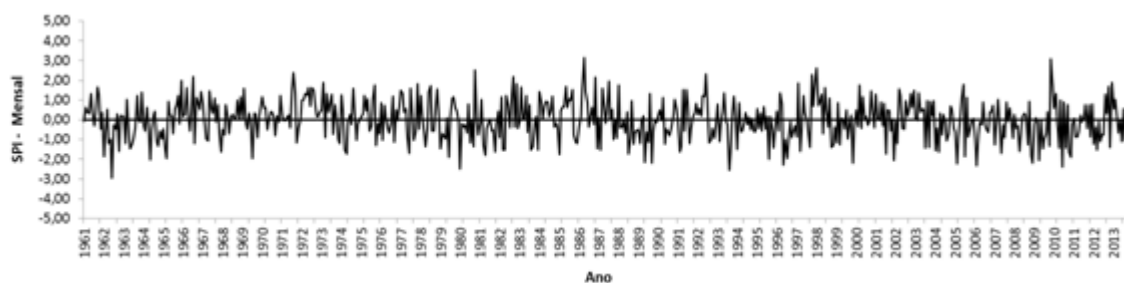


Figura 12- Comportamento dos valores mensais do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Santa Vitória do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana

Na aplicação do SPI mensal em cinco localidades do estado do Espírito Santo, Blain et al. (2010) objetivaram averiguar o ajuste das séries temporais dessa variável meteorológica à distribuição Gama, em cinco localidades do Estado. Os autores concluíram que a característica fundamental das séries de SPI é a sua grande variabilidade espaço-temporal, onde um mês seco pode ser precedido ou seguido de um mês úmido ou normal, ocasionando menores sequências de eventos de seca nas séries.

Silva (2015) caracterizou o comportamento da seca, utilizando índices meteorológicos para 40 estações, no período de 1913-2002, no estado do Rio Grande do Sul. Na análise do SPI, houve maior incidência de eventos de seca severa e extrema na década de 1943 a 1952, para os municípios de Bento Gonçalves, Bom Jesus, Caxias do Sul; Ijuí, Cruz Alta e São Francisco de Paula, cujas maiores sequências de meses secos ocorreram na classe de severidade de seca extrema.

5.5 Análise Conjunta dos Índices Agrícolas e Meteorológico

Na análise conjunta das séries temporais dos índices PDSI, Z e SPI (Figuras 4 a 12) pode-se observar uma maior ocorrência de secas severas e extremas para o índice PDSI em relação aos demais, sendo que o índice SPI teve maior proximidade dos eventos de seca severa e extrema em relação ao índice PDSI.

Verifica-se também que o comportamento destes índices são bem distintos, pois eles têm fundamentos físicos diferentes, ou seja, o índice SPI utiliza apenas dados mensais de precipitação em sua metodologia, enquanto no caso dos índices PDSI e Z, há uma maior complexidade em suas formulações. Nos índices agrícolas analisados são utilizados como dados de entrada, além da precipitação, o balanço hídrico no solo, a capacidade de água disponível (CAD) e a temperatura média mensal.

Para a localidade de Piracicaba/SP, Sansigolo (2004) no período de 1917 a 2001, comparou os índices PDSI e SPI, entre 1 e 60 meses, e concluiu que ambos são linearmente relacionados, indicando que a precipitação é o processo dominante no PDSI, apesar dos dois índices estarem sistematicamente defasados, devido ao PDSI levar em consideração o balanço hídrico. No período analisado encontrou a

partir do PDSI, 6 eventos moderados de seca e 1 extremo, com durações entre 7 e 23 meses. Para o SPI, ocorreram 6 eventos moderados de seca e 1 extremo, com durações entre 6 e 17 meses.

O número de eventos extremos também é reduzido com o aumento da escala temporal. Isso ocorre porque o aumento da escala temporal proporciona ao SPI a sensibilidade para identificar eventos de seca e umidade mais persistentes, ou seja, de maior duração (GUTTMAN, 1998).

Faria e Assunção (2008) analisaram o fenômeno para a cidade de Jataí no Sudoeste de Goiás, utilizando os índices PDSI, Z de Palmer e SPI, chegando a conclusão de que o índice Z e o SPI foram mais adequados para quantificar a seca agrícola para o Estado em estudo.

Os índices SPI e PDSI mostraram que o Vale do Jequitinhonha é atingido por eventos de secas, sendo caracterizadas pelo índice SPI como secas moderadas a muito secas; enquanto para o PDSI, classificado como secas inicial e suave. Não foram caracterizados por ambos os índices, eventos de seca extrema. A década de 70 foi caracterizada por períodos secos (PDSI) e úmidos (SPI), enquanto a década de 80 caracterizou-se pela maior ocorrência de períodos secos (SPI) e períodos úmidos (PDSI). A década de 90 até 2003 foi caracterizada por períodos secos, principalmente pelo índice SPI, ao contrário do PDSI, que caracterizou-se por maior ocorrência de períodos úmidos (GOIS, 2005).

5.6 Ocorrência de Eventos de Seca Severa e Extrema

5.6.1 Número de Ocorrências de Eventos de Seca Severa

Na tabela 6 é apresentado o total de eventos de seca severa para cada localidade do Estado, considerando o período de 1961 a 2013, bem como para o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), Índice de Anomalia (Z) e Índice Padronizado de Precipitação (SPI).

Tabela 6- Total de eventos de seca severa para cada localidade e para os três índices analisados

Localidade	PDSI	Z	SPI
Bagé	29	5	27
Bom Jesus	54	5	28
Encruzilhada do Sul	54	8	23
Iraí	30	15	33
Passo Fundo	38	10	18
Pelotas	43	9	32
Porto Alegre	43	19	29
Santa Maria	61	9	33
Santa Vitória do Palmar	31	12	30
São Luiz Gonzaga	48	10	30
Torres	29	7	33
Uruguaiana	52	2	34

As localidades que tiveram maior número de ocorrências de seca, considerando o índice PDSI, foram Santa Maria com 61 eventos, Uruguaiana com 52, Bom Jesus e Encruzilhada do Sul com 54 e Pelotas e Porto Alegre com 43 eventos de seca severa. Já para o índice Z foram Porto Alegre com 19 eventos e Iraí com 15 e Santa Vitoria do Palmar com 12 eventos de seca severa. Para o índice SPI verifica-se que Iraí, Santa Maria e Torres foram 33 eventos, para Uruguaiana 34 e Santa Vitória do Palmar e São Luiz Gonzaga, 30 eventos de seca severa.

Tabela 7. Número de eventos de seca severa, considerando o índice PDSI, para a escala mensal

Localidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bagé	6	3	5							3	6	6
Bom Jesus	5	3	9	4	3	4	3	4	2	4	8	5
Encruzilhada do Sul	3	4	4	2	1	3	5	2	7	4	8	11
Iraí	3	3	3	2			1	2	2	4	4	6
Passo Fundo	4	4	4	1	3	1	4	2	3	4	3	5
Pelotas	4	3	4	3	3	1	3	3	2	3	5	9
Porto Alegre	5	5	4	1				2	3	5	7	11
Santa Maria	4	4	2	2	2	2	5	7	10	6	10	7
Santa Vitória do Palmar	6	3	1			1			3	3	7	7
São Luiz Gonzaga	5	5	5		3	2	4	1	6	6	6	5
Torres	3		2	1					7	4	5	7
Uruguaiana	9	3	5	1	3	1	4	3	4	6	6	7

Apesar da importância da determinação do número de ocorrências de seca severa e extrema em escala anual, muitas vezes torna-se necessário conhecer quais os meses que apresentam maior déficit hídrico, principalmente em um Estado eminentemente agrícola, como é o caso do RS. Assim, são apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9, o número de eventos de seca severa ocorridos na escala mensal, para cada um dos municípios analisados, permitindo estabelecer qual o período mais crítico para as diferentes etapas de cultivo das culturas.

Tabela 8- Número de eventos de seca severa, considerando o índice Z, para a escala mensal

Localidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bagé			1								2	2
Bom Jesus				1						2		2
Encruzilhada do Sul	1	1					1		1		2	2
Iraí	3	1	2				3	1		1	2	2
Passo Fundo	2	1	1					2	1	1		2
Pelotas	3								1	1	2	2
Porto Alegre	5	1						2	2	2	3	4
Santa Maria	1	1						1	1		1	4
Santa Vitória do Palmar	3									2	4	3
São Luiz Gonzaga	2	2						1		1	2	2
Torres		1	1								2	3
Uruguaiana											1	1

Na análise da contagem dos eventos de seca severa mensal do índice PDSI observa-se que a maior ocorrência de seca ocorreu no mês de dezembro (86), seguido do mês de novembro (75) e por último, o mês de janeiro (57). No índice Z foram observados em dezembro (29), novembro (21) e janeiro com (20) eventos de seca severa.

Para o índice SPI na análise mensal de eventos de seca severa, observa-se uma distribuição mais uniforme ao longo dos meses sendo em dezembro (37), novembro (33) e janeiro (32).

Tabela 9- Número de eventos de seca severa, considerando o índice SPI, para a escala mensal

Localidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bagé	4	2	1	2	1	3	2	2	1	3	3	3
Bom Jesus	2	2	4		1	4	3	3	2	3	2	2
Encruzilhada do Sul	1	2	2	2		2	3	1	4	2	1	3
Iraí	1	1	3	4	3	3		4	4	1	5	4
Passo Fundo	2	1	1		2	2		4	3	2	1	
Pelotas	3	1	2	1	2	4	1	4	2	2	5	5
Porto Alegre	3	3	1	3	1	3	3	1	2	2	3	4
Santa Maria	2	2	3	5	2	3	1	4	5	2	3	1
Santa Vitória do Palmar	4	1	1	3	2	2	2	2	2	6	3	2
São Luiz Gonzaga	4	2	3	3	3	1	1	4	1	3	1	4
Torres	2	1	2	3		1	2	5	6	2	3	6
Uruguaiana	4	2	4	3	1	2	5	2	2	3	3	3

Na análise de ocorrências de inundações e estiagens para alguns municípios do Rio Grande do Sul no período de 2003 e 2009, Rodrigues (2011) analisou os danos socioeconômicos e humanos causados por estes eventos. O autor encontrou o maior número de registros de estiagens para a localidade de São Borja, com seis eventos entre 2003 e 2009. Com cinco registros de estiagens há 13 municípios, todos localizados na região Noroeste do Rio Grande do Sul, assim como 43 dos 47 municípios com quatro ocorrências de estiagens.

5.6.2 Número de Ocorrências de Eventos de Seca Extrema

Na avaliação dos totais de eventos de seca extrema, observa-se na Tabela 10, que os índices PDSI e SPI têm uma maior proximidade quanto ao número total de

eventos de seca extrema para algumas localidades, como por exemplo, Bom Jesus com 17 eventos e Passo fundo com 21. Na localidade de Santa Maria ocorreu o maior número de eventos de seca extrema, totalizando 30 para o PDSI e 4 eventos para o índice Z; enquanto para o SPI foram 14. Para o índice SPI destacam-se os municípios de Encruzilhada do Sul com 23 eventos, Porto Alegre e Iraí com 18, São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana com 15 eventos de seca extrema.

Na avaliação do total de eventos de seca extrema, o Índice Z demonstrou uma relação de menor ocorrência de seca extrema quando comparado ao PDSI, que possui a mesma metodologia para elaboração de seu cálculo, entretanto o índice Z não considera o mês anterior na sua equação final, o que justificaria a referida diferença.

O índice SPI foi o que mais se aproximou dos eventos de seca extrema comparativamente ao PDSI em algumas localidades (Tabela 10). Santos e Anjos (2001) ao utilizarem o SPI como ferramenta para o monitoramento das condições hídricas do estado de Pernambuco, concluíram que a utilização desse índice, além de caracterizar e indicar com certa antecedência situações de seca, também é capaz de indicar situações climáticas extremas entre diferentes microrregiões.

Na análise do total de eventos de secas extremas, é importante destacar como estes índices e suas classes de severidades se comportam no período em estudo e quais meses apresentam as maiores ocorrências dos mesmos. Nas Tabelas 11, 12, 13 e 14 são apresentados o número de eventos de seca extrema em escala mensal, tornando-se uma ferramenta útil para a caracterização da seca agrícola e meteorológica.

No período analisado, 1961 a 2013, para as doze localidades, foram observados eventos de secas extremas, que em sua totalidade foram menores que os eventos de secas severas. Isto pode ser notado pelo índice PDSI (Tabela 11), que apresentaram nos meses dezembro (52), novembro (44) e janeiro (39) eventos de seca extrema.

Tabela 10- Total de eventos de seca extrema para cada localidade e para os três índices analisados

Localidade	PDSI	Z	SPI
Bagé	25	2	17
Bom Jesus	17	0	17
Encruzilhada do Sul	21	2	23
Iraí	13	2	18
Passo Fundo	21	1	21
Pelotas	25	2	17
Porto Alegre	22	2	18
Santa Maria	30	4	14
Santa Vitória do Palmar	18	2	12
São Luiz Gonzaga	19	1	15
Torres	5	2	15
Uruguiana	24	3	15

Tabela 11- Número de eventos de seca extrema, considerando o índice PDSI, para a escala mensal para as localidades de Bagé, Bom Jesus, Encruzilhada do Sul, Iraí, Passo Fundo, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria

Localidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bagé	7	5	2					1			4	6
Bom Jesus		1	2	1				1	3	3	3	3
Encruzilhada do Sul	4	3	2				2	1	1	2	3	3
Iraí	2	1	5	1				1	1		1	1
Passo Fundo	1	1	4	1			1	3	3	2	4	1
Pelotas	4	3	2						2	1	6	7
Porto Alegre	4	3	3	1				1		1	4	5
Santa Maria	4	2	1	1	2	2		3	2	2	5	6

Tabela 13- Número de eventos de seca extrema, considerando o índice Z, para a escala mensal

[illegible]

Tabela 14- Número de eventos de seca extrema, considerando o índice SPI, para a escala mensal

Localidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bagé		1	2	1	2	3	1	2	2	1	1	1
Bom Jesus	2	1		2	1	1	1	2	1	1	2	3
Encruzilhada do Sul	3	1	2	2	3	2		2	1	2	3	2
Iraí	3	1		2	2	2	2	1		2	1	2
Passo Fundo	2	2	2	2	2		2	3	2	1	2	1
Pelotas	3	2	1	2	2	2	1		2	1		1
Porto Alegre	2	2	2	1	2		1	3	1	2	1	1
Santa Maria	2	2	1	1	2	1		1		1	1	2
Santa Vitória do Palmar	2	1				2	1		1	1	2	2
São Luiz Gonzaga	2	3	1	1	1	1		1	1	2	2	
Torres	3	1	1	1		1	1	1		2	3	1
Uruguaiana	1	2		1	3	2		2	1		1	2

Para o índice Z ocorreram menores eventos de seca extrema, podendo ser observado na localidade de Bom Jesus, que não registrou nenhum evento de seca extrema. Assim os meses que tiveram maiores ocorrências de seca extrema foram novembro (10), dezembro (4) e janeiro (4).

Na análise mensal de eventos extremos para o índice SPI, foram observados nos meses de janeiro (25), novembro (19) eventos de seca extrema para as doze localidades.

5.6.3 Sequências de Períodos de Seca Severa e Extrema

Na Tabela 15 são apresentadas as contagens dos maiores períodos de ocorrência de seca severa do índice PDSI, Z e SPI para a série de 1961 a 2013.

Tabela 15- Contagem dos maiores períodos de ocorrência dos eventos de seca severa para os municípios do estado do Rio Grande do Sul, considerando os três índices

Localidade	PDSI	Z	SPI
Bagé	Dez-78 a Mar-79 Out-89 a Jan-90 Nov-10 a Fev-11	Nov/Dez-85 Dez-05	Ago/Set-93 Nov/Dez-05
Bom Jesus	Dez-85 a Mar-86 Out/Nov/Dez-95 Jan/Fev/Mar-05	Set-77 Dez-85	Out/Nov-71 Fev-04
Encruzilhada do Sul	Dez-67 a Fev-68 Nov-69 a Jan-70 Set a Dez-70	Out-81 a Jan-82 Dez-95	Jul/Ago-68 Fev/Mar-73 Fev/Mar-88
Iraí	Jul a Out-81 Out a Dez-12	Nov-95 Out-01	Nov/Dez-85 Mar/Abr-99
Passo Fundo	Jan a Abr-82 Dez-85 a Fev-86 Dez-11 a Fev-12	Dez-85 a Jan-86 Fev-05	Jul/Ago-88 Set-91
Pelotas	Nov/Dez-85 Jan a Mar-91 Nov-99 a Fev-00	Out-98 Jan-00 Jan-07	Ago/Set-80 Jun/Jul-89
Porto Alegre	Nov-73 a Fev-74 Nov-85 a Jan-86	Set/Out-70 Jan/Fev-05	Jun/Jul-62 Set/Out-74
Santa Maria	Jan a Mar-65 Ago a Set-80	Dez-85 a Jan-86 Dez-08	Out/Nov-85 Out/Nov-91
Santa Vitória do Palmar	Set-62 a Jan-63 Nov-05 a Jan-06 Nov-11 a Jan-12	Jan-05 Jan/Fev-07	Out/Nov-69 Ago a Nov-73
São Luiz Gonzaga	Out-01 a Jan-02 Fev/Mar-04	Nov/Dez-95 Nov-11	Jul/Ago-88 Ago/Set-91
Torres	Set a Dez-71 Set/Nov-06	Nov/Dez-71 Mar-88	Jul/Ago-88 Ago-04
Uruguaiana	Out-63 a Mar-64 Dez-99 a Fev-02	Dez-67 Nov-11	Fev/Mar-65 Mar-Abr-82

Na análise dos períodos de maiores sequências de ocorrências de seca severa para algumas localidades do Rio Grande do Sul, observa-se que as maiores ocorrências foram para o PDSI, nos meses de verão e os anos de 1967/68/69/70, de 1985/86, de 1995/96 e também nos anos de 2004/2005, em que o Estado sofreu com as consequências de uma forte estiagem.

Nedel et al. (2010) consideraram que houve um período entre os anos de 2004 e 2005, em que ocorreu um período de seca em função da reduzida precipitação, podendo estar associado às características dos fenômenos El Niño e La Niña. O El

Niño quando manifesta-se com toda a sua intensidade causa muitas chuvas ao Estado, mas quando de forma fraca, a intensidade dos eventos é menor.

Para o índice Z ocorreram menores eventos de seca severa, apesar de que o referido índice leva em consideração as mesmas equações do PDSI, entretanto não considera a umidade do dia anterior. Mesmo assim ocorreu seca severa nas 12 localidades, nos anos de 1981/82/85, 1995/96, 1999/2000/2005, eventos em 2007 e 2011, sendo na maioria nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro.

Matzenauer (2002) analisou as safras agrícolas no período entre 1985 e 2005, no estado do Rio Grande do Sul, com a ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña e concluiu que houve, no período, dez reduções de colheita sendo quatro em anos neutros, três em anos de ocorrência de La Niña e três em anos de El Niño.

O SPI teve ocorrências de seca severa mais distribuída ao longo dos meses, caracterizando maiores ocorrências para o período de verão como janeiro, fevereiro, novembro e dezembro. Foram classificadas secas severas em junho, julho e agosto. Nos anos de 1962/69, 1974, e na década de 80 com registros em 1981/82/85/86, nos anos de 1999 e 2000 e para 2004 e 2005.

Silveira e Assis (2000) avaliaram a probabilidade de ocorrência de períodos secos de duração variada, para a cidade de Pelotas/RS, com uma série de dados de 1967 a 1998. Os autores obtiveram o total de dias secos para cada mês e, em seguida, selecionaram o mês de abril, para estudar a ocorrência de sequência mais longa, por apresentar a maior soma de dias secos durante os anos estudados. Os resultados mostraram que no município, para o mês considerado, foram registrados de 5 a 17 dias consecutivos sem precipitação e o número de ocorrências mais longo foi de 8 ocorrências, no intervalo de 7 a 11 dias secos seguidos.

Na Tabela 16 encontra-se a contagem dos maiores períodos de ocorrência de seca extrema para as doze localidades analisadas, considerando os índices PDSI, Z e SPI.

Tabela 16- Contagem dos maiores períodos de ocorrência dos eventos de seca extrema para os municípios do estado do Rio Grande do Sul, considerando os três índices

Localidade	PDSI	Z	SPI
Bagé	Nov-71 a Jan-72 Dez-85 a Fev-86	Jun-90 Nov-10	Maio/Jun-62 Nov-85 Abr-09
Bom Jesus	Out a Dez-62 Nov/Dez-85	--	Jul/Ago-88 Jun-04
Encruzilhada do Sul	Jan/Fev-79 Dez-05 a Mar-06	Nov/Dez-85	Jan-79 Nov-85
Iraí	Fev a Abr-78 Jan a Mar-12	Jan-79 Nov-01	Jan-82 Jan-85
Passo Fundo	Nov/Dez-85 Fev/Mar-05	Nov-85	Fev/Mar-88 Out-85 Mar-04
Pelotas	Set a Nov-70 Dez-84 a Fev-85 Nov/Dez-11	Out-70 Nov-98	Jan/Fev-91 Out-98
Porto Alegre	Nov-81 a Jan-82 Jan/Fev-00 Jan/Fev-05	Nov-71 Mar-88	Jan-82 Nov-11
Santa Maria	Out-85 a Jan-86 Jan a Mar-05	Out/Nov-71 Nov-85	Dez-85 Dez-11
Santa Vitória do Palmar	Dez-99 a Jan-00 Dez-06 a Jan-07	Out-73 Nov-08	Jan-07 Out/Nov-08
São Luiz Gonzaga	Nov/Dez-95 Dez-11 a Mar-12 Set a Nov-04	Dez-85	Nov-85 Fev/Mar-04
Torres	Out/Dez-62 Mar-12	Nov/Dez-62	Out/Nov-62 Jan-05
Uruguaiana	Dez-67 a Fev-68 Nov-96 a Jan-97 Dez-07 a Jan-08	Jan-79 Dez-08 Nov-10	Nov-99 Fev-05

Na análise das sequências dos períodos de eventos de seca extrema para o PDSI, observa-se que as maiores ocorreram nos anos de 1971/1972, 1981/82/84/85/86, 1999/2000, 2005 e 2011/12 para as doze localidades. Fernandes et al. (2010) observaram que o PDSI não classificou nenhum mês como extremamente seco no estado de Goiás, no entanto, classificou períodos muito secos, em 2 anos, moderadamente secos, em 5 anos, e pouco secos, em 18 anos.

Para o índice Z teve menores ocorrências de seca extrema como na localidade de Bom Jesus, que não registrou nenhum evento e em outras localidades menores e isolados 1961/62, 1971, 1979, 1990, 1985/88, 1998, 2008 e 2010. Estes eventos

podem estar relacionados com a influência da La Niña. Segundo Porto (2005), os anos de ocorrência de La Niña foram 1916/17, 1920/21, 1924/25, 1928/29, 1931/32, 1938/39, 1942/43, 1949/50, 1954/55, 1964/65, 1970/71, 1973/74, 1975/76, 1988/89, 1995/96, 1998/01 e 2003/04.

Na avaliação do índice SPI foram observados ocorrências de seca extrema nos anos de 1962, 1979, 1982/85/88, 1999, 2005, 2007/08/09 e 2011, sendo a maioria ocorrida nos meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro, apresentando em algumas localidades eventos de seca extrema em junho, julho e agosto.

5.7 Análise dos Índices de Seca em Escala Anual

Nas figuras 13 a 19 são apresentados o comportamento da média dos índices de secas agrícola e meteorológico em escala anual, no período de 1961 a 2013. Na avaliação das médias anuais de cada localidade dos respectivos índices percebe-se o comportamento dos eventos de seca ao longo dos anos, cujos valores vão desde o extremamente úmido à seca severa, e algumas localidades seca extrema, tendo em vista que são apresentadas médias anuais dos índices, por isto as intensidades são menores nas ocasiões em que ocorre seca extrema.

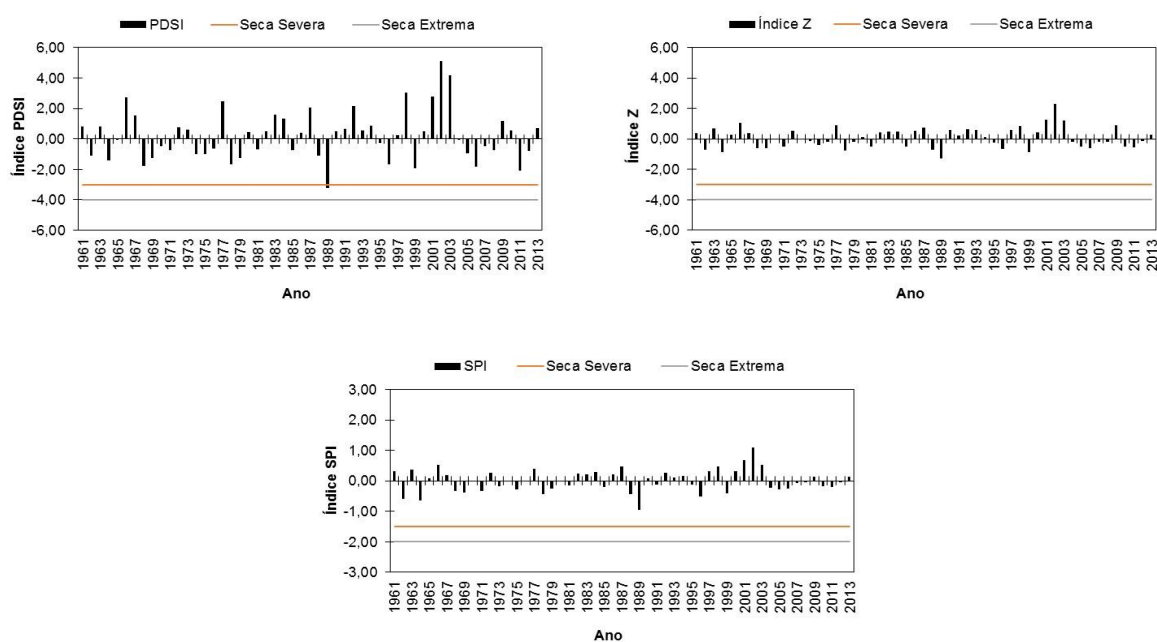
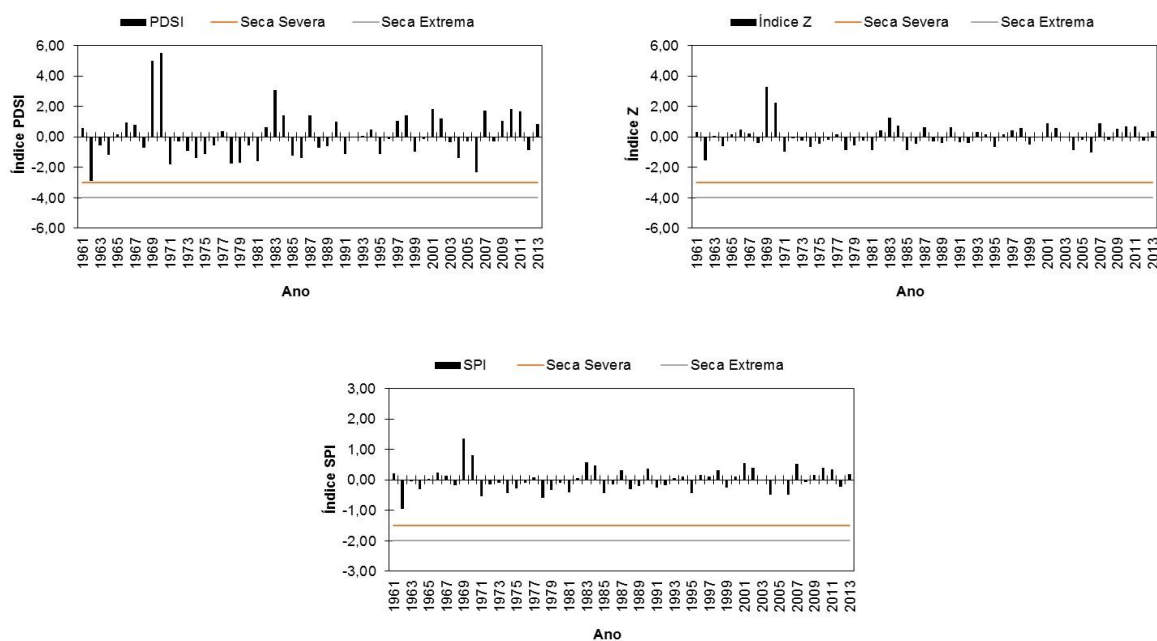


Figura 13- Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para a localidade de Bagé

a) Bom Jesus



b) Encruzilhada do Sul

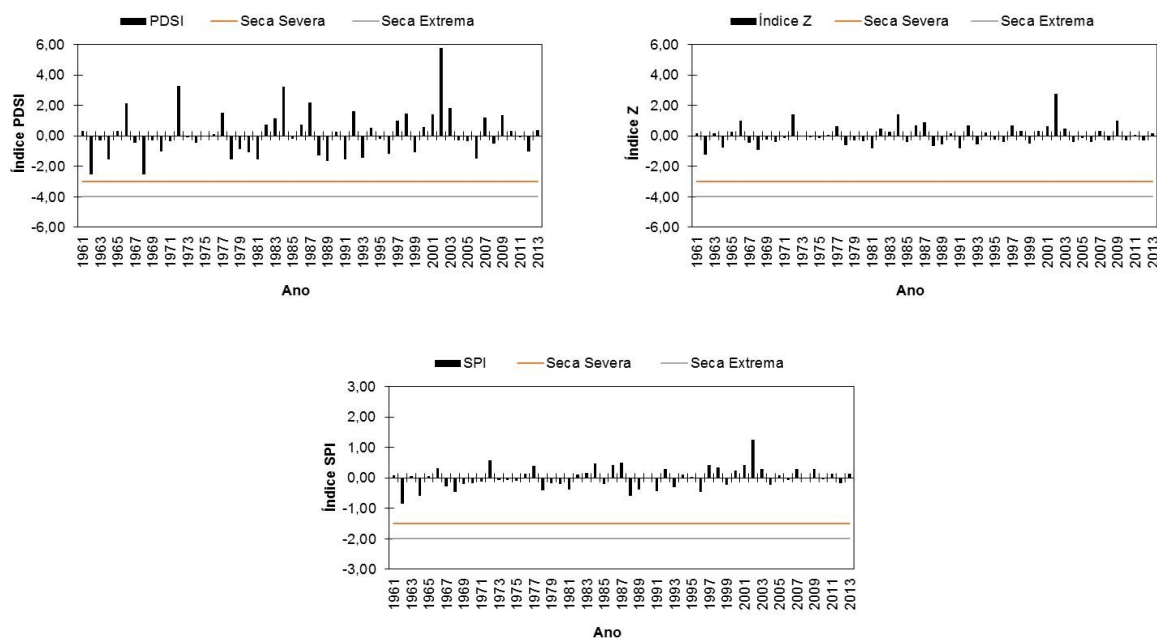
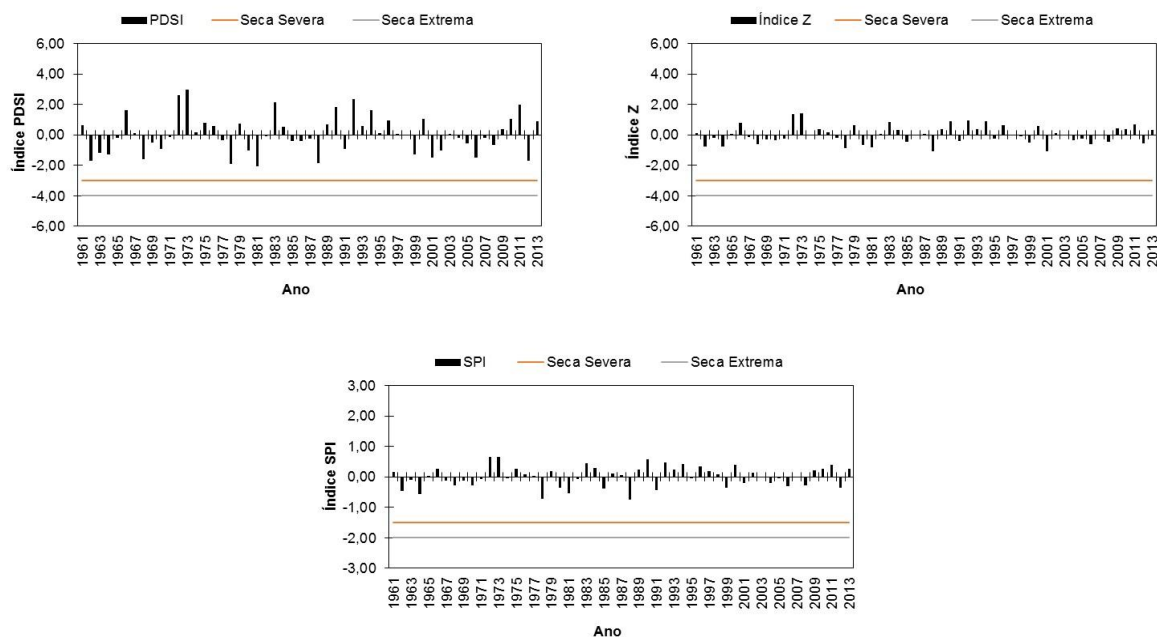


Figura 14- Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bom Jesus e Encruzilhada do Sul

a) Iraí



b) Passo Fundo

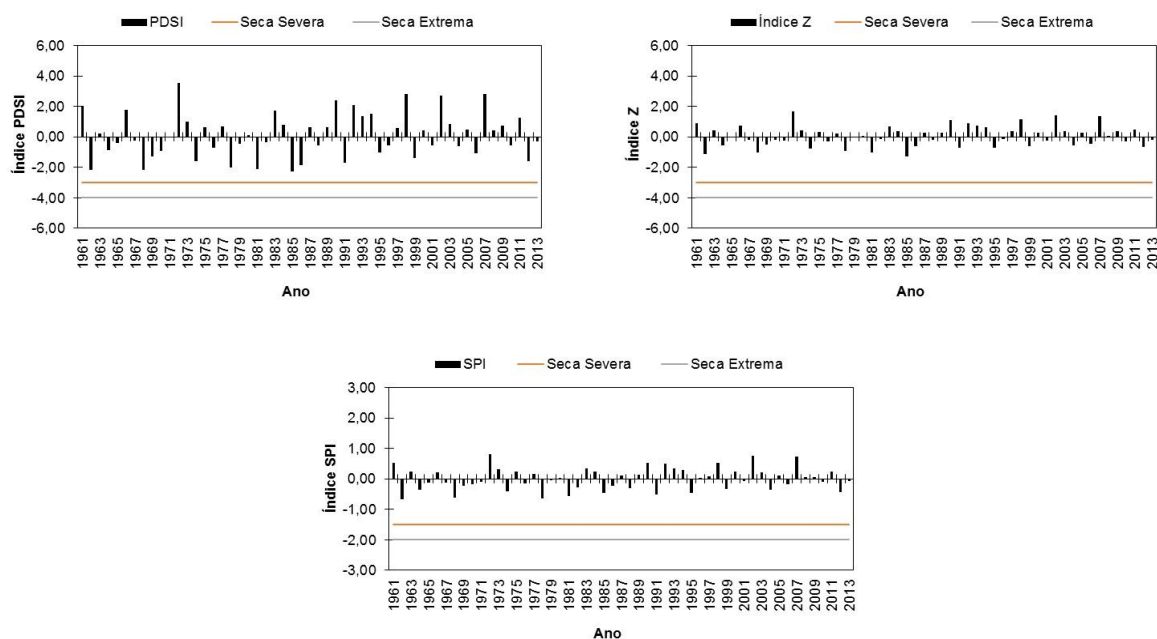
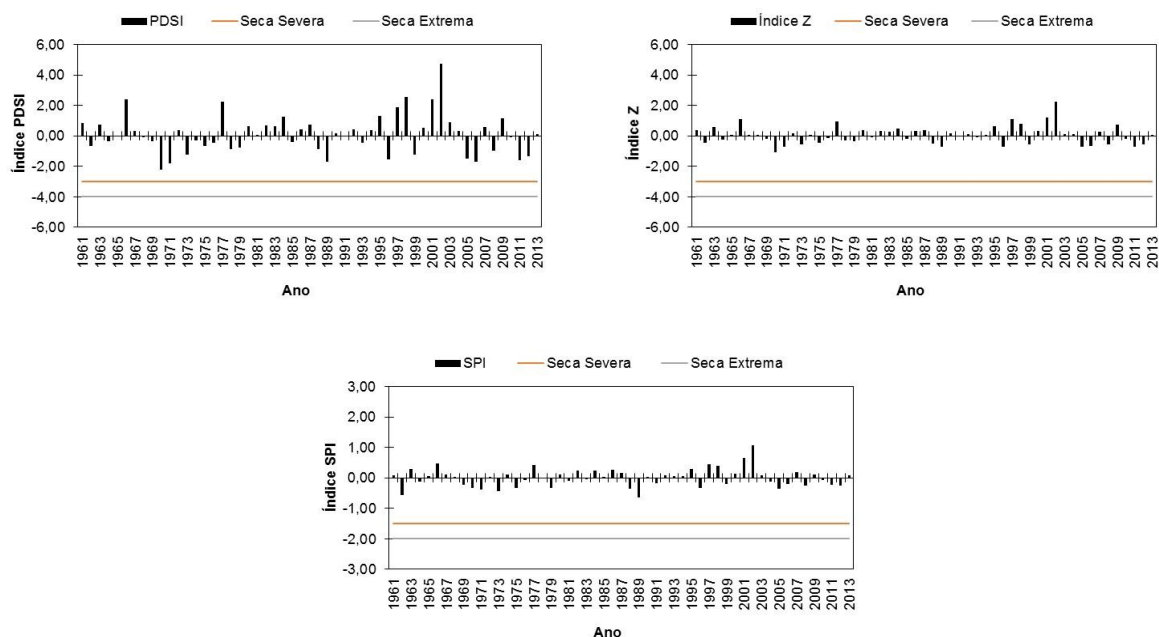


Figura 15- Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Iraí e Passo Fundo

a) Pelotas



b) Porto Alegre

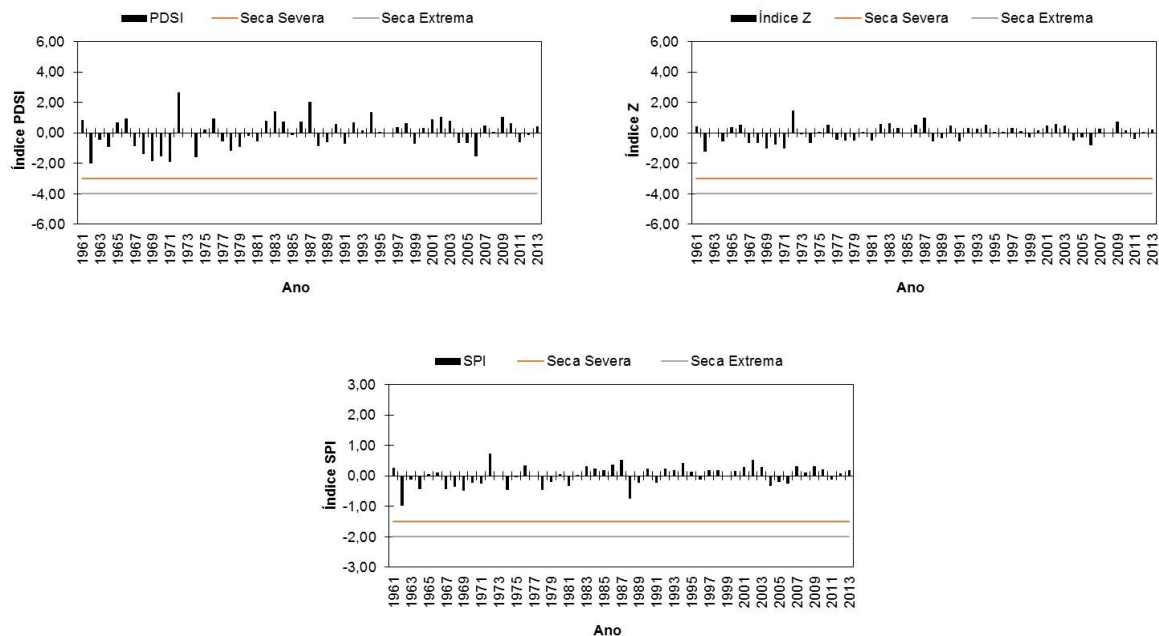
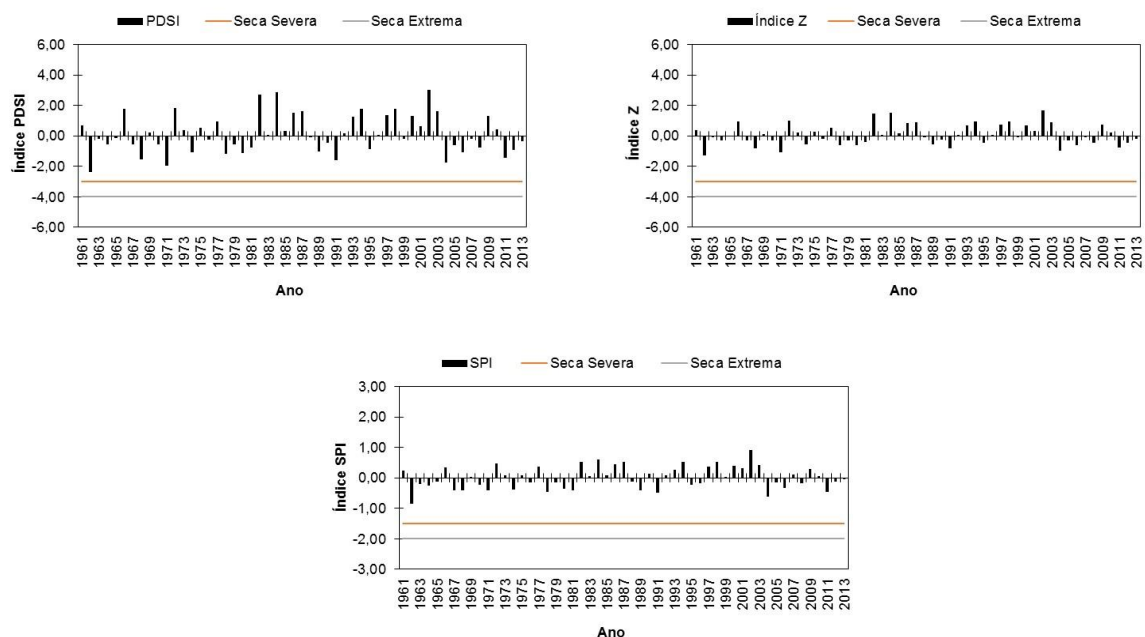


Figura 16- Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Pelotas e Porto Alegre

a) Santa Maria



b) Santa Vitória do Palmar

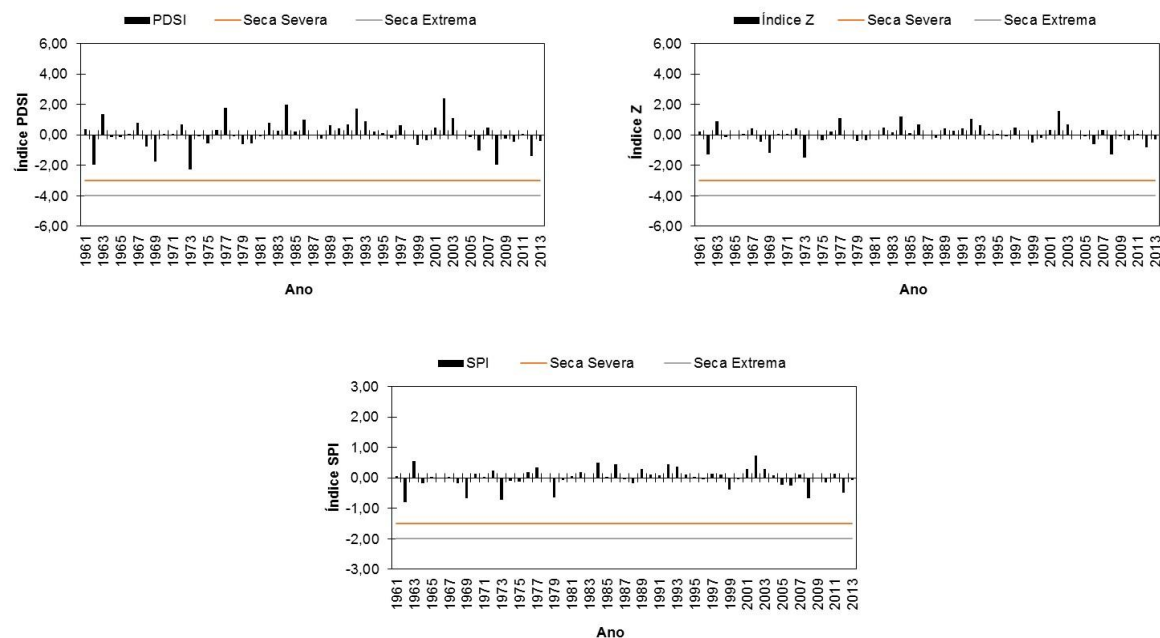
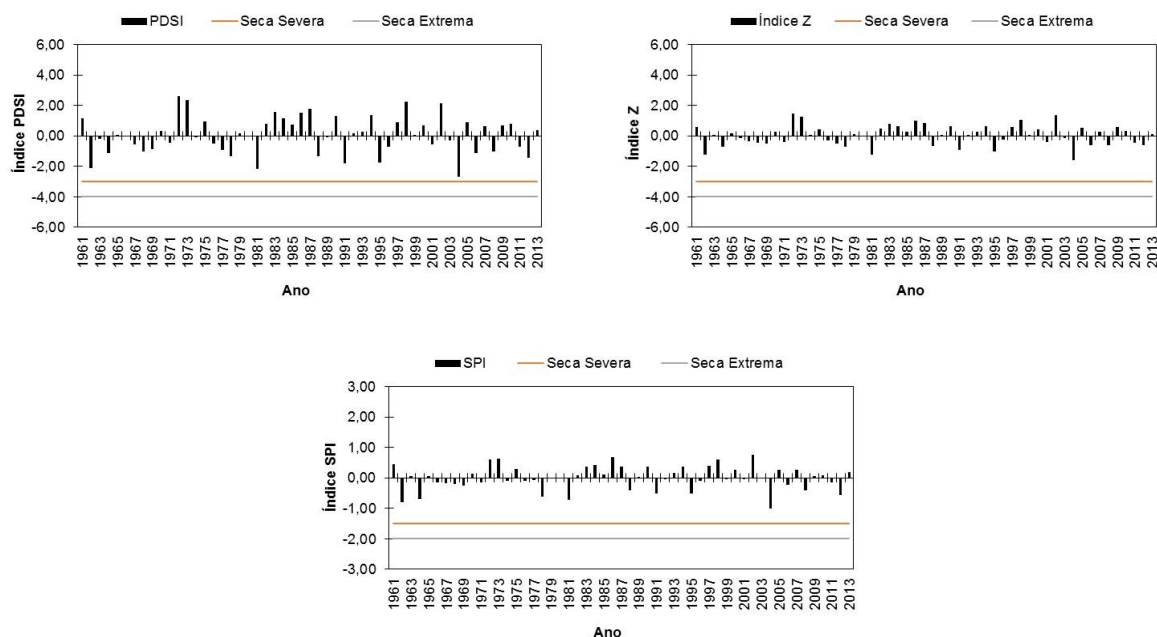


Figura 17- Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de Santa Maria e Santa Vitória do Palmar

a) São Luiz Gonzaga



b) Torres

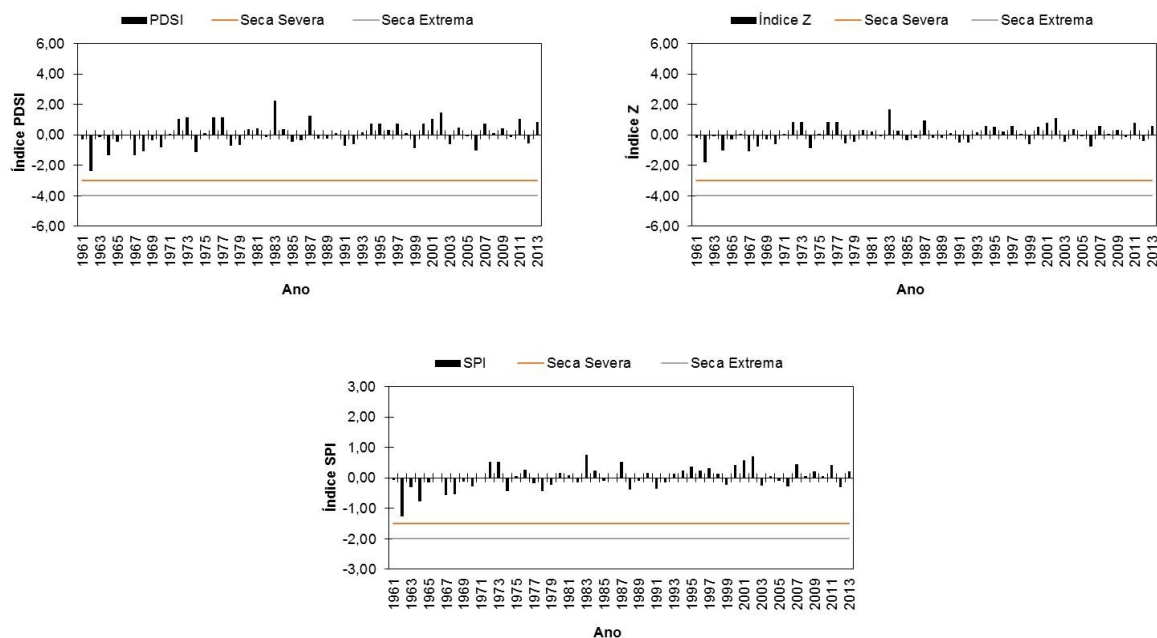


Figura 18- Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para as localidades de São Luiz Gonzaga e Torres

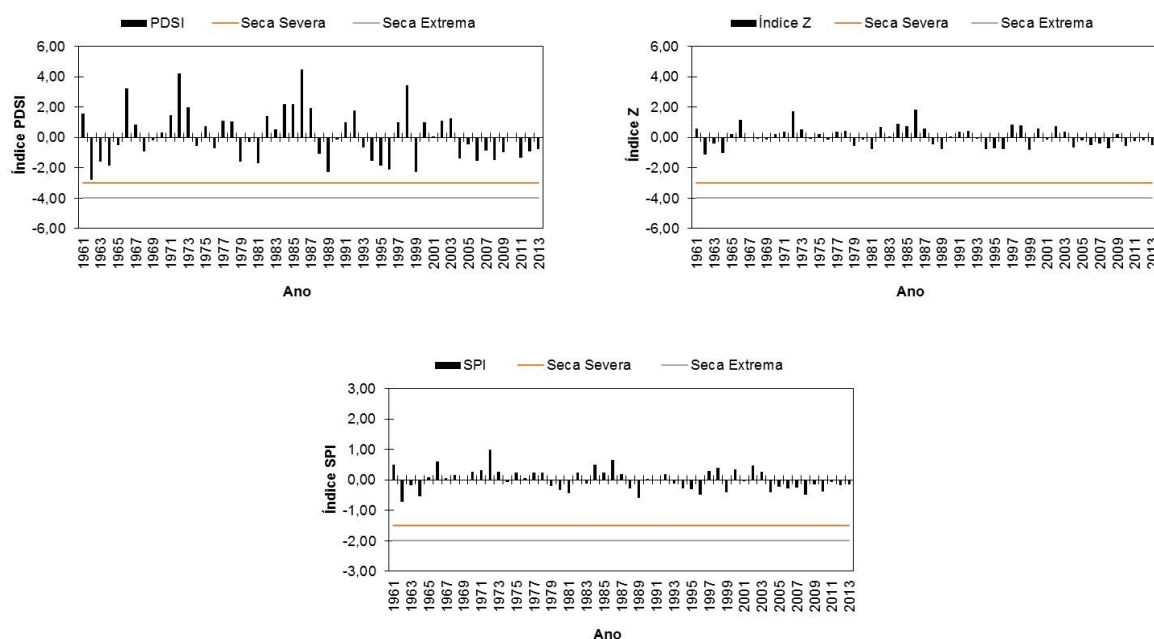


Figura 19- Comportamento da média dos índices de seca PDSI, índice Z e SPI em escala anual, para o período de 1961 a 2013, para a localidade de Uruguiana

Na localidade de Bagé verifica-se alguns anos classificados como secas suaves e moderadas, como por exemplo, nos anos de 1969 e 2011; no ano de 1989 observa-se a ocorrência de um valor classificado como seca severa, para o índice PDSI; já para o Índice Z não houve valores tão negativos em relação ao índice anterior. Para o SPI, no ano de 1989, observa-se que também teve valor negativo, mas não permitiu a classificação do período como severo e extremo.

Na análise realizada na localidade de Bom Jesus, observa-se que no início de 1962 ocorreu um evento de seca classificado como severo e em 2007, como seca moderada para o PDSI; já para o Z, os valores foram menores e para o SPI não apresentou nenhuma seca severa e extrema.

Como observa-se para algumas localidades, as médias anuais como por exemplo, para a localidade de Porto Alegre, não obteve nenhum valor médio classificado como severo ou extremo, mas alguns anos considerados secos, como em 1962 e de 1968 a 1972, sendo classificado como seca moderada para o PDSI; o índice Z não apresentou nenhum valor severo ou extremo. Para o SPI ocorreram valores mais negativos nos anos de 1962 e 1989.

Santos (1998) que utilizou o PDSI para caracterizar os períodos de seca para o estado de São Paulo, observou a ocorrência de 69 eventos de seca, com duração

ente 5 a 6 meses (janeiro a junho), sendo a maioria classificados como seca suave a moderada.

Para o índice PDSI, na localidade de Uruguaiana ocorreram nos anos de 1962/63/64 e 1992/93/94/95 valores caracterizados como secos, enquanto que para o índice SPI, os resultados foram próximos a partir de 2004 a 2013, com valores negativos anuais.

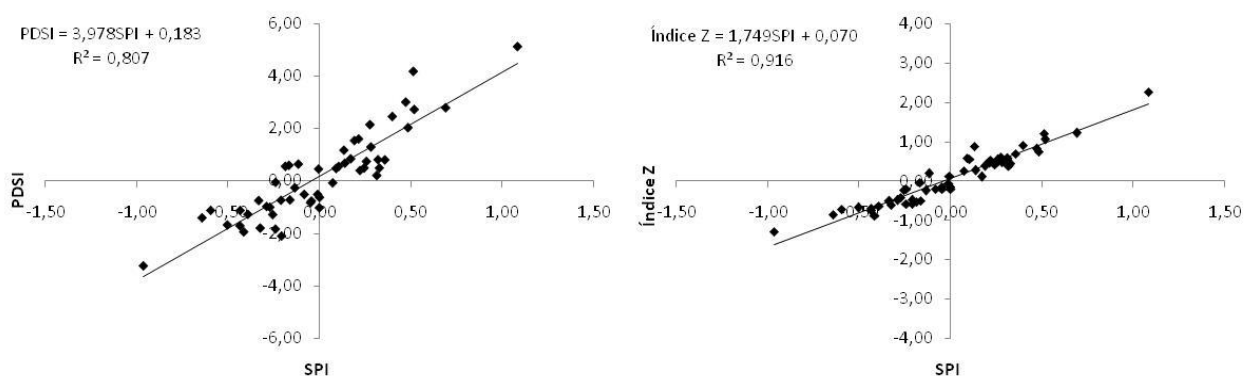
Para Torres, de 1961 até 1972, os valores foram negativos, sendo classificados como severos, moderado e ligeiramente seco em comparação com o índice SPI, os quais foram próximos, de acordo com a classificação de cada índice, onde o índice Z apresentou uma classificação do tipo moderado.

Silva (2013) verificou no período analisado para o índice SPI, no estado do Rio Grande do Sul que na grande maioria das localidades estudadas, a ocorrência de seca surge a partir dos anos de 1916 e 1917. Na análise das décadas, a maior ocorrência de seca severa e extrema foi na década de 1943/52, havendo escassa ocorrência das mesmas na última década analisada (1993/2002), para todas as estações.

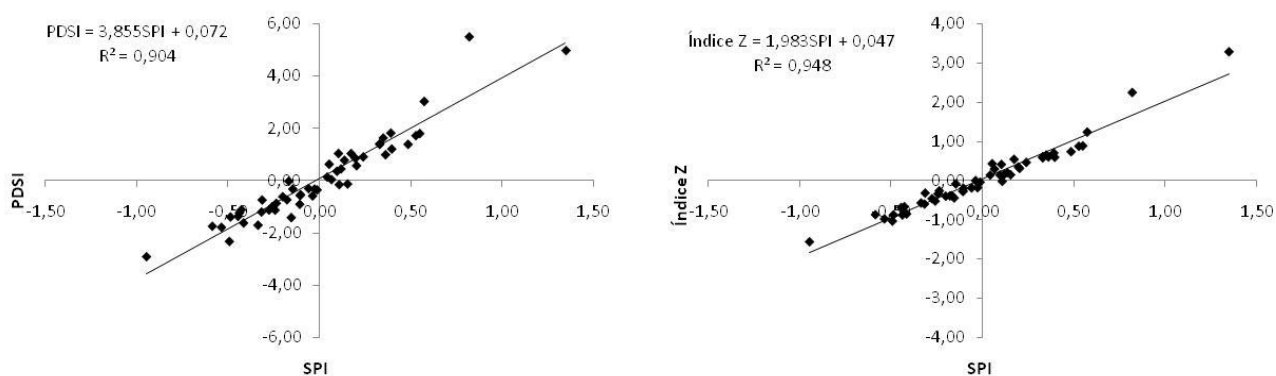
5.8 Comparação entre os Índices em Escala Anual

Nas Figuras 20 a 23 são apresentadas as regressões lineares entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades analisadas, com o objetivo de verificar a coerência entre os mesmos. No período de análise (1961 a 2013) e em todas as localidades, o intercepto manteve-se próximo a 0 e os valores do coeficiente angular da reta variaram de 2,076 (Torres) a 4,330 (Uruguaiana); para a regressão SPI versus PDSI e para a regressão SPI versus Z, de 1,518 (Porto Alegre) a 1,983 (Bom Jesus). Os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram ligeiramente superiores para a regressão de SPI versus Z, quando comparados aos obtidos pela regressão SPI versus PDSI. Os valores de R^2 variaram de 0,807 (Porto Alegre) a 0,949 (Passo Fundo), indicando que houve um bom ajuste do modelo linear aplicado. Considerando os valores do coeficiente de correlação (R), observa-se que os mesmos podem ser classificados como altos, $> 0,90$, indicando uma correlação positiva entre os índices analisados.

a) Bagé



b) Bom Jesus



c) Encruzilhada do Sul

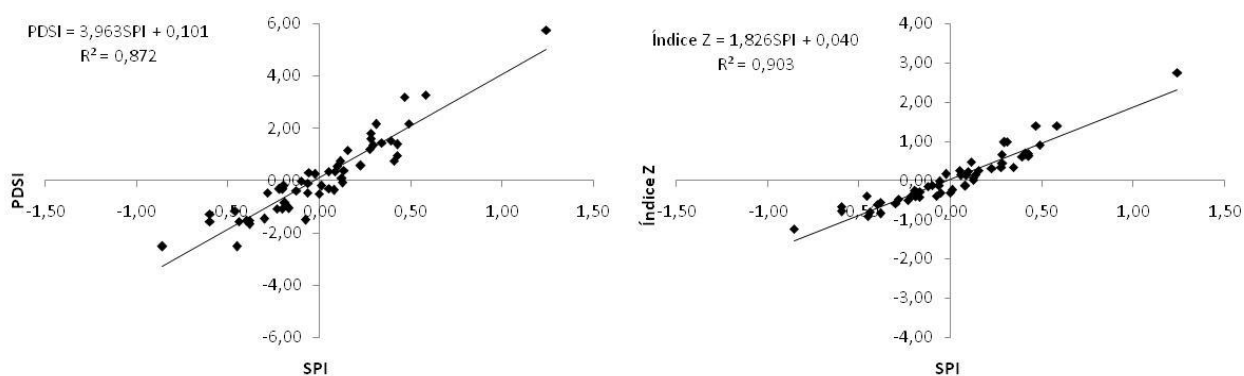
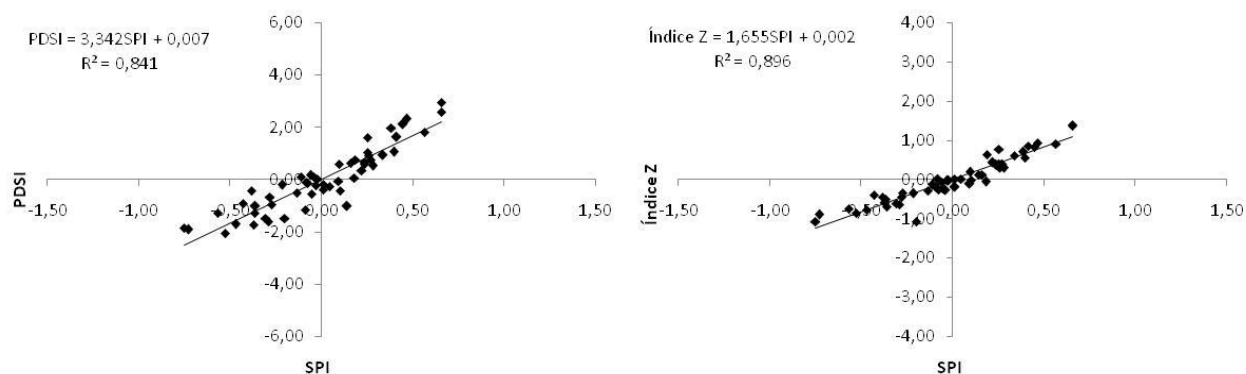
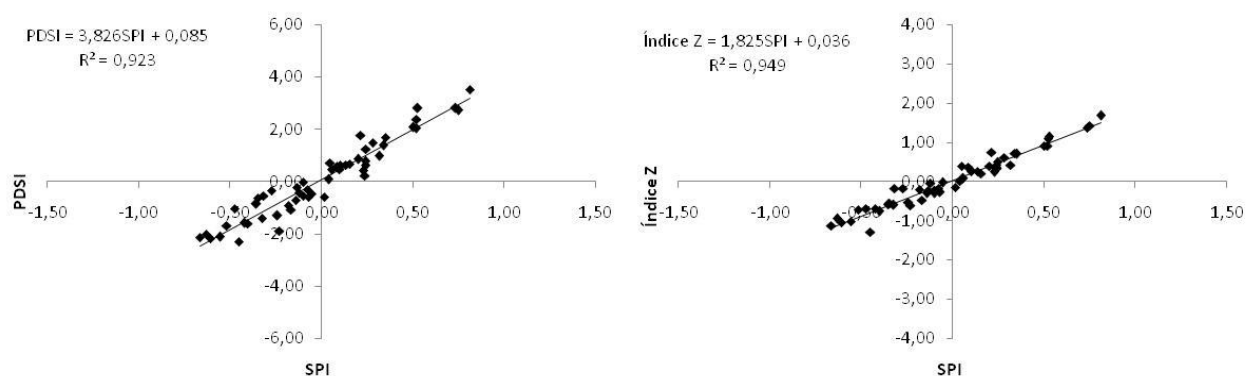


Figura 20- Correlações entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, considerando o período de 1961 a 2013, para as localidades de Bagé, Bom Jesus e Encruzilhada do Sul

a) Iraí



b) Passo Fundo



c) Pelotas

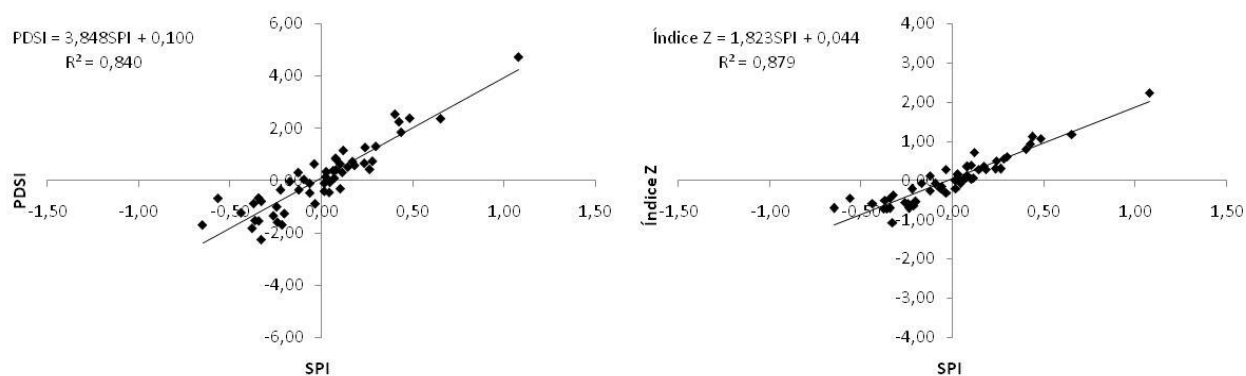
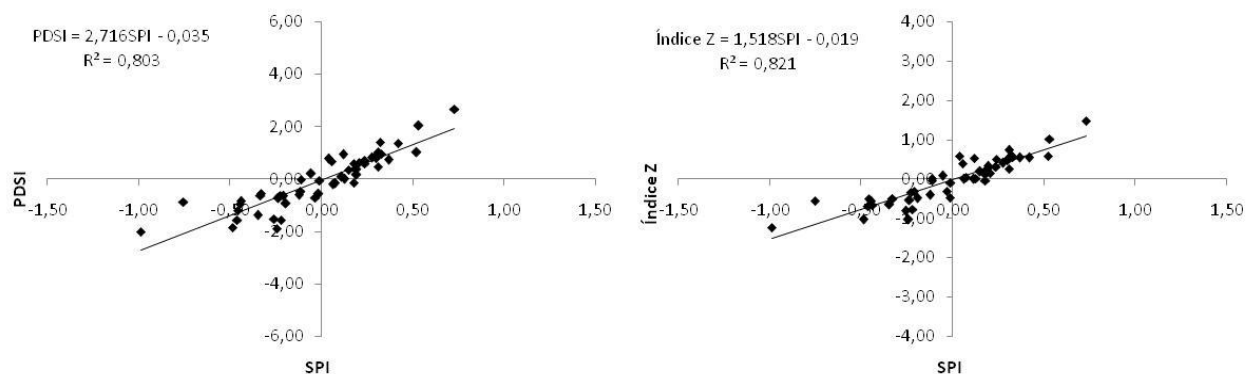
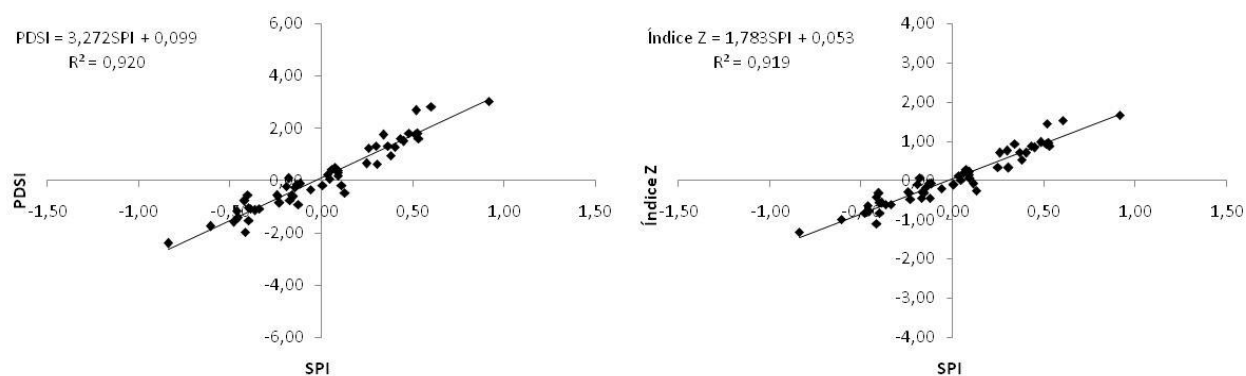


Figura 21- Correlações entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, considerando o período de 1961 a 2013, para as localidades de Iraí, Passo Fundo e Pelotas

a) Porto Alegre



b) Santa Maria



c) Santa Vitória do Palmar

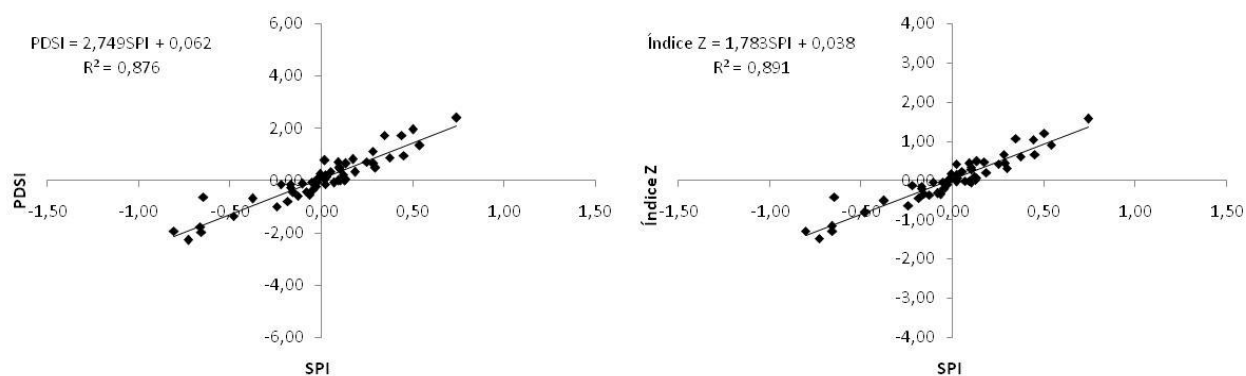
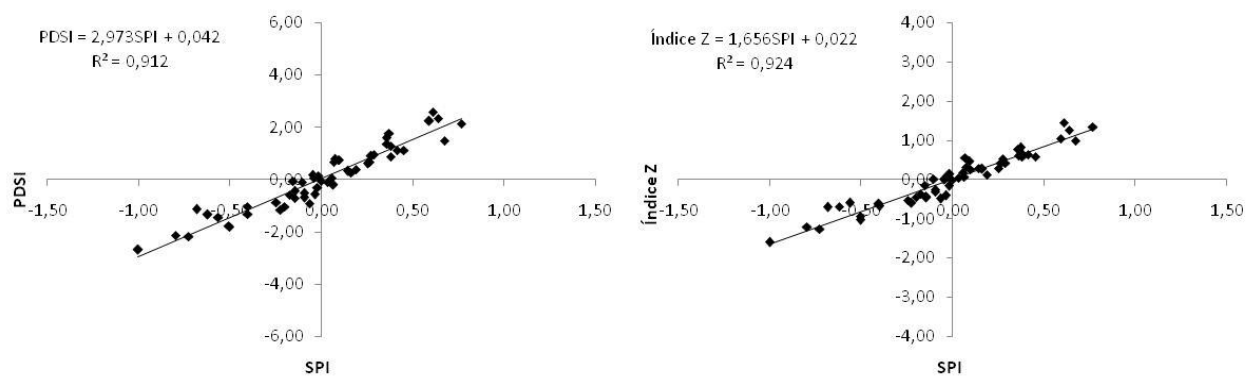
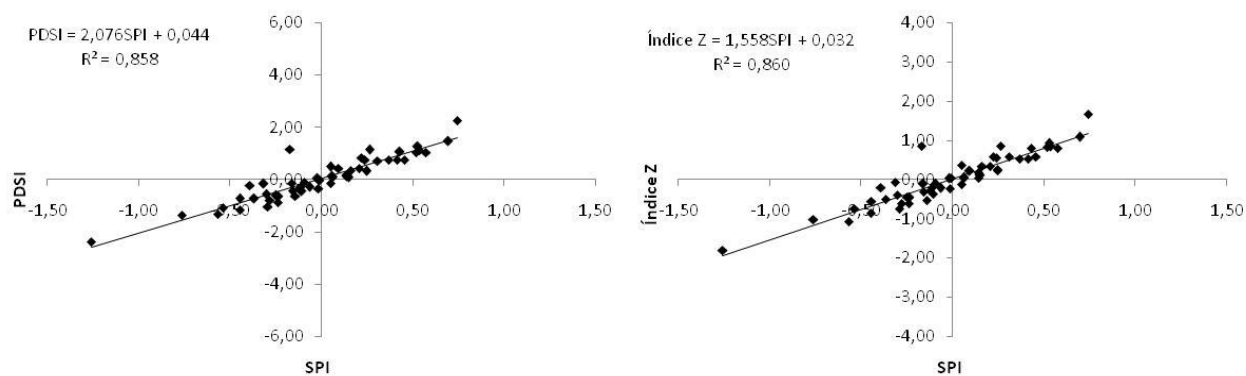


Figura 22- Correlações entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, considerando o período de 1961 a 2013, para as localidades de Porto Alegre, Santa Maria e Santa Vitória do Palmar

a) São Luiz Gonzaga



b) Torres



c) Uruguaiana

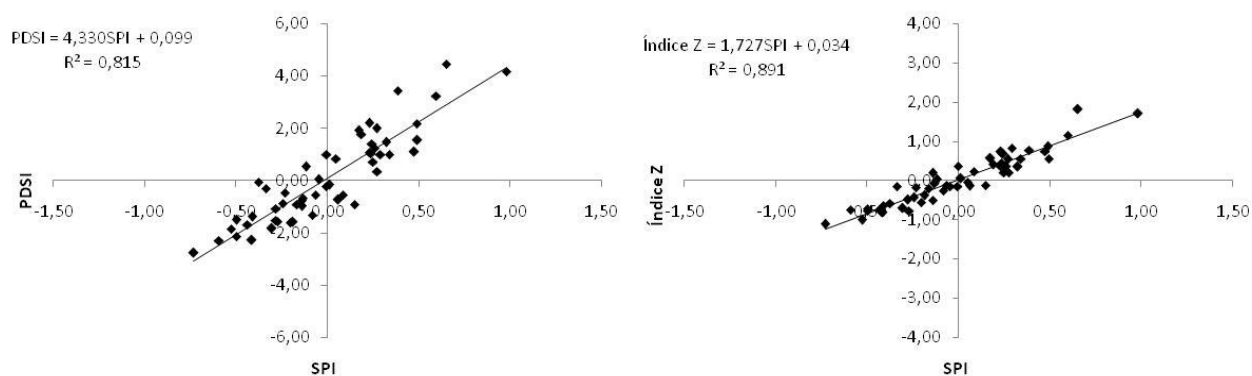


Figura 23- Correlações entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z, considerando o período de 1961 a 2013, para as localidades de São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana

Os resultados obtidos com o ajuste linear ($Y = \beta_0 + \beta_1 X$) obtidos a partir do teste t (t -Student), apenas para o coeficiente angular (β_1) entre os valores dos índices médios anuais de seca SPI versus PDSI e SPI versus Z estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17- Resultados obtidos para o parâmetro angular (β_1) entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul

Localidade	SPI versus PDSI		SPI versus Z	
	β_1	t_{calc}	β_1	t_{calc}
Bagé	3,978	14,61	1,749	23,61
Bom Jesus	3,855	21,96	1,983	30,60
Encruzilhada do Sul	3,963	18,69	1,826	21,79
Iraí	3,342	16,42	1,655	21,00
Passo Fundo	3,826	24,76	1,825	30,86
Pelotas	3,848	16,41	1,823	19,30
Porto Alegre	2,716	14,24	1,518	15,10
Santa Maria	3,272	24,25	1,783	24,15
Santa Vitória do Palmar	2,749	18,99	1,783	20,45
São Luiz Gonzaga	2,973	23,10	1,656	25,02
Torres	2,076	17,59	1,558	17,73
Uruguaiana	4,330	15,03	1,727	20,49

β_1 = coeficientes angular do ajuste linear; $t_{\text{tab}} (5\%) = 2,01$; Significância = 5%.

Verifica-se que os valores dos índices de seca obtidos pela metodologia de Palmer (PDSI) não diferem dos valores dos índices SPI, para todas as localidades analisadas, visto que os valores calculados da estatística “ t ” para β_1 , foram maiores do que o valor crítico de “ t ”, para um nível α de probabilidade de 5%. Assim, rejeita-se a hipótese de nulidade, podendo-se afirmar que o coeficiente angular da reta é diferente de zero, ou seja, há associação entre os índices, não havendo diferença estatística entre os mesmos. Diante dos resultados obtidos é possível inferir que apesar dos índices PDSI e Z utilizarem parâmetros do solo e de temperatura, o elemento de grande importância na determinação dos mesmos é a precipitação pluvial, uma vez que os mesmos não mostraram diferença. Esse fato é um indicativo

de que os índices agrícola e meteorológico são espacialmente coerentes no estado do Rio Grande do Sul, considerando as doze estações analisadas.

É necessário destacar que as análises referidas anteriormente foram obtidas a partir dos valores dos seus respectivos índices em escala anual, ou seja, são oriundos das médias de doze meses de cada ano. Assim as variações entre os valores do índices são pequenas devido ao fator “diluição” dos mesmos no decorrer de cada ano. Na Figura 13 observa-se que o PDSI atingiu o valor de -3,23 no ano de 1989, para a localidade de Bagé, o índice Z de -1,81, e o SPI de -1,26 para Torres, ambos em 1962. Por outro lado verifica-se que esses mesmos índices atingiram valores de -5,35, em janeiro de 1997, -4,73, em novembro de 1962 e -3,30 em abril de 1978, respectivamente.

A análise dos índices em escala mensal permite conhecer a severidade em períodos em que ocorre maior concentração de eventos de seca considerados significativos, constituindo-se em uma ferramenta útil para estabelecer estratégias mais seguras para o planejamento, prevenção e combate à seca. Assim, é possível conhecer os meses críticos de déficit hídrico, que podem afetar as etapas de cultivo das culturas de interesse, influenciando no rendimento final.

Segundo Faria (2011) na análise do comportamento dos índices de seca com relação a produção de soja, notaram que os anos de 1999 e 2001, em que ocorreu queda na produtividade, apresentaram ocorrências de seca com magnitudes significativas, tanto no mês de dezembro quanto no mês de janeiro, coincidentes com o período crítico da cultura.

Com o objetivo de analisar os impactos diretos e indiretos da seca na produção agropecuária provocada pela estiagem que ocorreu em 2007/2008, Fochezatto e Grando (2009) consideraram que as principais lavouras de verão são as que mais sofrem com a estiagem, destacando-se a soja, fumo, milho e feijão, que representam 60% do total da produção das lavouras temporárias. Os autores concluíram que a ocorrências de estiagem é um fator fundamental no desempenho da economia do Estado, com foco na propagação da prática da irrigação.

A partir da escala mensal de análise, foram calculadas as correlações entre o SPI e o método de Palmer (1965), bem como do SPI e do índice Z de anomalia hídrica. Nas Tabelas 18, 19 e 20 estão apresentadas as equações de regressão

linear, o valor da estatística do teste t para o parâmetro angular (β_1), além do coeficiente de regressão (R) obtidos entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul, considerando o mês de novembro, dezembro e janeiro, respectivamente.

Tabela 18- Equações de regressão linear, estatística do teste t para o parâmetro angular (β_1) e coeficiente de regressão (R) obtidos entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul, considerando o mês de novembro

Localidade	SPI versus PDSI			SPI versus Z		
	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	t_{calc}	R	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	t_{calc}	R
Bagé	$y = -0,247 + 2,066x$	7,94	0,74	$y = -0,478 + 1,718x$	14,23	0,89
Bom Jesus	$y = -0,154 + 2,241x$	11,04	0,84	$y = -0,083 + 1,751x$	17,44	0,95
Encruzilhada do Sul	$y = -0,487 + 1,943x$	7,28	0,72	$y = -0,445 + 1,587x$	13,78	0,89
Iraí	$y = -0,146 + 1,502x$	7,15	0,73	$y = -0,271 + 1,590x$	14,71	0,91
Passo Fundo	$y = -0,328 + 1,857x$	8,37	0,76	$y = -0,147 + 1,656x$	21,25	0,97
Pelotas	$y = -0,813 + 2,096x$	10,27	0,84	$y = -0,675 + 1,729x$	15,21	0,91
Porto Alegre	$y = -0,746 + 1,935x$	8,26	0,77	$y = -0,723 + 1,576x$	11,57	0,86
Santa Maria	$y = -0,498 + 2,477x$	11,33	0,86	$y = -0,407 + 1,662x$	11,76	0,86
Santa Vitória do Palmar	$y = -0,908 + 2,009x$	11,27	0,88	$y = -0,694 + 1,650x$	14,78	0,91
São Luiz Gonzaga	$y = -0,360 + 1,999x$	10,10	0,82	$y = -0,271 + 1,740x$	16,33	0,92
Torres	$y = -0,466 + 1,960x$	15,48	0,91	$y = -0,421 + 1,723x$	18,18	0,93
Uruguaiana	$y = -0,224 + 2,126x$	9,16	0,79	$y = -0,370 + 1,949x$	18,43	0,94

β_0 = coeficiente linear do ajuste linear; β_1 = coeficientes angular do ajuste linear; $t_{tab} (5\%) = 2,01$; Significância = 5%.

Tabela 19- Equações de regressão linear, estatística do teste t para o parâmetro angular (β_1) e coeficiente de regressão (R) obtidos entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul, considerando o mês de dezembro

Localidade	SPI versus PDSI			SPI versus Z		
	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	t_{calc}	R	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	t_{calc}	R
Bagé	$y = -0,766 + 1,916x$	6,28	0,67	$y = -0,752 + 1,699x$	16,19	0,92
Bom Jesus	$y = +0,077 + 2,144x$	10,35	0,83	$y = -0,009 + 1,891x$	19,66	0,97
Encruzilhada do Sul	$y = -0,899 + 1,894x$	6,49	0,69	$y = -0,620 + 1,691x$	16,91	0,92
Iraí	$y = -0,380 + 1,682x$	8,87	0,79	$y = -0,346 + 1,764x$	25,17	0,96
Passo Fundo	$y = -0,038 + 1,971x$	9,54	0,80	$y = -0,073 + 1,915x$	21,21	0,97
Pelotas	$y = -1,274 + 2,012x$	7,81	0,80	$y = -0,846 + 1,678x$	14,02	0,91
Porto Alegre	$y = -1,393 + 1,328x$	4,39	0,62	$y = -1,083 + 1,314x$	8,58	0,85
Santa Maria	$y = -0,377 + 2,735x$	13,84	0,91	$y = -0,291 + 1,830x$	21,47	0,95
Santa Vitória do Palmar	$y = -1,288 + 1,966x$	8,80	0,85	$y = -0,918 + 1,525x$	12,31	0,90
São Luiz Gonzaga	$y = -0,503 + 2,395x$	14,56	0,91	$y = -0,349 + 1,835x$	23,86	0,96
Torres	$y = -0,803 + 1,892x$	11,16	0,87	$y = -0,657 + 1,637x$	14,68	0,90
Uruguaiana	$y = -0,726 + 2,177x$	7,58	0,74	$y = -0,608 + 1,680x$	15,24	0,91

β_0 = coeficiente linear do ajuste linear; β_1 = coeficientes angular do ajuste linear; $t_{\text{tab}} (5\%) = 2,01$; Significância = 5%.

Tabela 20- Equações de regressão linear, estatística do teste t para o parâmetro angular (β_1) e coeficiente de regressão (R) obtidos entre os valores de SPI versus PDSI e SPI versus Z, para as doze localidades do estado do Rio Grande do Sul, considerando o mês de janeiro

Localidade	SPI versus PDSI			SPI versus Z		
	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	t_{calc}	R	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	t_{calc}	R
Bagé	$y = -0,808 + 1,634x$	5,08	0,60	$y = -0,353 + 1,705x$	20,12	0,94
Bom Jesus	$y = +0,191 + 1,824x$	9,03	0,80	$y = +0,185 + 1,752x$	15,87	0,97
Encruzilhada do Sul	$y = -0,688 + 1,658x$	5,93	0,66	$y = -0,264 + 1,593x$	15,03	0,91
Iraí	$y = -0,266 + 1,608x$	7,03	0,72	$y = -0,100 + 1,722x$	16,25	0,93
Passo Fundo	$y = -0,100 + 1,752x$	9,25	0,80	$y = -0,113 + 1,662x$	21,14	0,97
Pelotas	$y = -0,944 + 1,625x$	6,07	0,69	$y = -0,441 + 1,562x$	15,88	0,92
Porto Alegre	$y = -1,183 + 1,447x$	5,66	0,71	$y = -0,619 + 1,541x$	16,61	0,93
Santa Maria	$y = -0,330 + 2,779x$	16,13	0,94	$y = -0,168 + 1,841x$	18,49	0,95
Santa Vitória do Palmar	$y = -1,240 + 2,062x$	9,20	0,85	$y = -0,800 + 1,638x$	14,45	0,91
São Luiz Gonzaga	$y = -0,639 + 1,993x$	9,27	0,80	$y = -0,379 + 1,651x$	18,75	0,94
Torres	$y = -0,242 + 2,002x$	20,26	0,94	$y = -0,100 + 1,800x$	19,58	0,96
Uruguaiana	$y = -0,737 + 1,972x$	6,83	0,70	$y = -0,292 + 1,844x$	15,08	0,91

β_0 = coeficiente linear do ajuste linear; β_1 = coeficientes angular do ajuste linear; $t_{\text{tab}} (5\%) = 2,01$; Significância = 5%.

Independente do mês analisado (novembro, dezembro ou janeiro) (Tabelas 18, 19 e 20) é possível observar que as correlações entre os valores dos índices estudados não diferiram entre si, para todas as localidades analisadas, visto que os valores calculados da estatística “t” para β_1 , foram maiores do que o valor crítico de “t”, para um nível α de probabilidade de 5%. Assim, rejeita-se a hipótese de nulidade, podendo-se afirmar que o coeficiente angular da reta é diferente de zero, ou seja, não há diferença estatística entre os índices PDSI, Z e SPI. Com relação aos valores do coeficiente de regressão (R) verifica-se que para o mês de novembro obtiveram-se, de maneira geral, os menores valores (0,86 e 0,89) em comparação aos meses de dezembro e janeiro.

Sansigolo (2004) comparou séries históricas do PDSI e do SPI na região de Piracicaba nos anos de 1917 a 2001, usando análise espectral. Esse autor concluiu que esses dois índices são linearmente relacionados (apesar de uma defasagem sistemática) e que a precipitação é o elemento dominante nos valores do PDSI. Essa última afirmação parece concordar com Karl (1986), quando este demonstra que o PDSI ao ser calculado com evapotranspiração potencial igual a média mensal da região em questão (em vez da realmente ocorrida), não apresenta uma alteração tão significativa em seus valores, principalmente se comparado a que ocorreria se o período de “calibração” fosse alterado. Ainda segundo Sansigolo (2004), o PDSI apresentou uma excepcional memória, a qual pode ser explorada para fins de previsão e o SPI não apresentou periodicidade significativa.

Nedel et al. (2010) realizaram um levantamento junto a Defesa Civil do estado do Rio Grande do Sul, entre os anos 2003-2009 das secas ocorridas no Estado, com o objetivo de analisar a frequência mensal e anual dos eventos. Os autores constataram que nesses anos houve mais de mil eventos de secas, sendo que desses, o verão também é a estação do ano que apresenta maior número de ocorrência.

6 CONCLUSÕES

Houve uma maior concentração dos eventos de seca severa e extrema, sendo maior para o Índice de Severidade de Seca de Palmer, seguido do Índice Padronizado de Precipitação e com menores ocorrências de seca, para o Índice de Anomalia de Umidade de Palmer.

De maneira geral, os meses de janeiro, novembro e dezembro foram os responsáveis pela maior quantidade de eventos de secas, nas doze localidades analisadas.

Houve uma boa correlação entre o Índice Padronizado de Precipitação versus o Índice de Severidade de Seca de Palmer, bem como entre o Índice Padronizado de Precipitação versus o Índice de Anomalia de Umidade de Palmer, tanto em escala anual quanto mensal.

É possível a utilização do Índice Padronizado de Precipitação para as doze localidades estudadas no estado do Rio Grande do Sul, para analisar os eventos de seca, necessitando somente de dados de precipitação como entrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables. New York: Dover, 1046p. 1965.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Sistema de informações hidrológicas (HidroWeb). Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em 26 abr. 2015.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998, 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologisch e Zeitschrift, Fast Track. p.1-13, 2013.
- BARRA, T. S. COSTA, J. M. N. RAO, T. R. SEDIYAMA, G. C., FERREIRA, W. P. M. DANTAS NETO, F. S. Caracterização climatológica da severidade de secas do estado do Ceará - Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. V. 6, n.2, p. 266-272, 2002.
- BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: Bergamaschi, H. Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre: Ed. Universitária UFRGS, 1992. cap.1, p.11-24
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 110p.
- BERLATO, M. A.; MELO, I. B.; CORDEIRO, A. P. A.; PORTO, R. O.; FERREIRA, T. N.; ALMEIDA, A. C.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; EVERLING, P. As estiagens e as perdas na agricultura: fenômeno natural ou imprevidência? Esteio: **FEDERACITE**, p.17-42, 2005.
- BLAIN, G. C. **Adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do índice padronizado de precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo**. 120f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo de Campinas. São Paulo. 2008.

BLAIN, G. C. Considerações estatísticas relativas a seis séries mensais de temperatura do ar da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.26, p.279-296, 2011.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise comparativa dos índices de seca de Palmer, Palmer adaptado e índice padronizado de precipitação no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.22, n.1, p.105-111, 2007.

BLAIN, G. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEZZOPANE, J. E. M.; BONOMO, R. Índice padronizado de precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.10, p.1067–1073, 2010.

BOSCHI, R. S.; OLIVEIRA, S. R. M.; ASSAD, E. D. Técnicas de mineração de dados para análise da precipitação pluvial decenal no Rio Grande do Sul. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1189-1201, 2011.

CAMARGO, M. B. P. CAMARGO, A. P. Representação gráfica informatizada do extrato do balanço hídrico de Thornthwaite & Mather. **Bragantia**, Campinas, v.52, p.169-172, 1993.

CARDOSO, C. O.; ULLMANN, M. N.; EBERHARDT, E. L. Balanço hídrico agroclimático para LAGES-SC. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.2, n.2, p.118-130, 2003.

CASTRO, F. S; PEZZOPANE, J. E. M; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.14, n.8, p.871–880, 2010.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (CPTEC-INPE). 2011. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: nov. 2011.

CONRADO, H.; MARIANO, G. L.; CARVALHO, L. C. Veranicos no Rio Grande do Sul – Nova metodologia para quantificação de eventos. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.36, p.445–455, 2014.

CUNHA, R. L. A. **Definição de cenários de referência para avaliação dos impactos das secas**. 2008.147f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Porto. 2008.

Domingos, S.I. Análise do Índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer Drought Severity Index (PDSI). (Tese de Licenciatura em Meteorologia). Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal, 2006.

DUNKEL, Z. Brief surveying and discussing of drought indices used in agricultural meteorology. **Quarterly Journal Hungarian Meteorological Service**, v.113, p.23-37, 2009.

FARIA, S. M. O fenômeno seca e a produtividade agrícola do Estado de Goiás. 2011. 130f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, 2011.

FARIA, S.M.; ASSUNÇÃO, H.F. da. Estimativa dos índices de seca PDSI e Z de Palmer e avaliação das suas influências sobre a produção agrícola no Município de Jataí - GO. *Revista Geografia Ensino & Pesquisa*, Santa Maria, v.11, p.3736-3749, 2008

FARIAS, A. A.; SOUZA, J. T. A.; SOUSA F. A. S. Identificação e análise de secas severas e extremas no município de Taperoá-PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.7, n.5, p.818-826, 2014.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F. E.; AMORIM, A. O. Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.8, p.771-779, 2010.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A.; DA PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. Índices para a quantificação da seca. Embrapa, Goiás, 2009.

FERREIRA, J.H.D.; NERY, J.T. Análise estatística da precipitação pluviométrica no Estado do Rio Grande do Sul. In: **XI Congresso Brasileiro De Agrometeorologia**, 1999, **Anais...** Florianópolis – SC.

FOCHEZATTO, A.; GRANDO, M. Z. Produção agropecuária e crescimento econômico no Rio Grande do Sul: uma análise de insumo-produto. In: **47º Congresso Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Soc. Rural**. 14f, 2009. **Anais...** Porto Alegre-RS, 2009.

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M.; MATOS, R. M.; BANDEIRA, M. M.; SANTOS, D. Análise e Mapeamento dos Índices de Umidade, Hídrico e Aridez através do BHC para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife v.8, n.4, p.1093-1108, 2015.

FREITAS J. C.; ANDRADE, A. R. C.; BRAGA, C. C. NETO A. H. G. ALMEIDA, T. F. Análise de Agrupamentos na Identificação de Regiões Homogêneas de Índices Climáticos no Estado da Paraíba, PB – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.6, n.4, p.732-748, 2013.

GOIS, G. de. Caracterização da seca e seus efeitos na produção da cultura de milho para diferentes regiões do estado de Minas Gerais. 2005. Dissertação– Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

GROSS, J. A.; REIS, J. T.; SAUSEN, T. M. Avaliação Socioeconômica dos Municípios Afetados pela estiagem no Rio Grande do Sul de 2000 a 2010. In: Congresso Brasileiro sobre Desastres Naturais, 2012. **Anais...** Rio Claro.

GURRAPU, S.; CHIPANSHI, A.; SAUCHYN, D.; HOWARD, A. Comparison of the SPI and SPEI on predicting drought conditions and stream flow in the Canadian prairies. In: American Meteorological Society Annual Meeting, 2014. **Anais...** Atlanta/Geórgia.

GUTTMAN, G.B. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources*, Washington, v.16, n.2, p. 113-121, 1998.

HEIM JÚNIOR, R. R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *American Meteorological Society*, p.1149-1165, 2002.

HORIKOSHI, A. S.; FISCH, G. Balanço Hídrico Atual e Simulações para Cenários Climáticos Futuros no Município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**. Taubaté, v.2, n.2, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2015. Disponível em: <http://mapas.fee.tche.br/wpcontent/uploads/Mesorregioes.pdf>.

Acessado 13 de Mai. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 26 de abr. 2015.

KARL, T. The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-Index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.25, p.77-86, 1986.

LANDERDAHL, M. L. Modelo de dimensionamento de projetos de açudes (MDPA) - processo de desenvolvimento de uma ferramenta de dimensionamento de projetos de açudes do tipo construção de terra. 2010. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso. UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS, São Leopoldo, RS, 2010.

LIMEIRA, R. C.; AZEVEDO, P. V.; BEZERRA, W. A.; ALMEIDA, M. V.; MENEZES, H. E. A. Aplicação do Índice de Severidade de Seca de Palmer para o Estado da Paraíba. **Revista Fafibe On Line**, Bebedouro, n.3, p.1-6, 2007.

MARENGO, J. A.; OLIVEIRA, G. S. Impactos do fenômeno La Niña no tempo e clima do Brasil: desenvolvimento e intensificação do La Niña 1998/1999. In: **X CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 1998, Brasília, 1998.

MATZENAUER, R. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.10, n.1, p.35-43, 2002.

MATZENAUER, R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BARNI, N. A.; MALUF, J. R. T.; RADIN, B.; ANJOS, C. S. Época de semeadura para milho e soja visando à redução de risco por deficiência hídrica, no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo fundo, v.13, n.2, p.191-200, 2005.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 8.,

1993, Boston. **Anais...** Boston: American Meteorological Society, 1993. p.179-184. (Preprints)

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.391, p.202–216, 2010.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Revista Acta Amazônica**. V.35, n.2, 207 – 214, 2005.

NEDEL, A. S.; SAUSEN, T. M.; SAITO, S. M. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003–2009-Parte I. Seca. In: XVI **Congresso Brasileiro de Meteorologia: Saúde e meio ambiente**. 2010, . **Anais...** Belém/PA

NERY, J. T.; BALDO, M. C.; MARTINS, M. L. O. F. O comportamento da precipitação na Bacia do Itajaí. **Revista Acta Scientiarum**, Maringá, v.22, n.5, p.1429-1435, 2000.

PAIVA, E. M. C. D.; CLARKE, R. T. Modelagem Estocástica da Precipitação na Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.2, n.2, p.157-171, 1997.

PALMER, W.C. Meteorological drought. US Weather Bureau, (Research Paper, nº45). Washington, 58p, 1965

PAZ, R. L. F.; FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; AMORIM, A. O. Avaliação das secas por meio de comparação dos índices de seca com a produtividade agrícola. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010. **Anais...** Belém/PA.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Estimativa de evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, p.41-99, 1997.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.346-352, 2009.

PORTO, R. O. As estiagens e as perdas na agricultura: fenômeno natural ou imprevidência? In: NASCIMENTO, C. A. M.; SILVEIRA FILHO, I. L.; BERTON, A. L.;

BERLATO, M. A.; MELO, I. B.; CORDEIRO, A. P. A.; PORTO, R. O.; FERREIRA, T. N.; ALMEIDA, A. C.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. EVERLING, P. As estiagens e as perdas na agricultura: fenômeno natural ou imprevidência? Esteio: **FEDERACITE**, p.17-42, 2005.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v.100, p.81–92, 1972.

QUIRING, S. M.; PAPAKRYIAKOU, T. N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.118, p.49-62, 2003.

RODRIGUES, A. **Estatística espacial e análise de cluster em dados de desastres naturais: mapeamento das estiagens e inundações no Rio Grande do Sul entre 2003 e 2009**. 2011. 77 f. Monografia (Bacharel em estatística) – Faculdade de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SANSIGOLO, C. A. Análise comparativa do desempenho dos índices de seca de Palmer (PDSI) e da precipitação normalizada (SPI) em Piracicaba, SP (1917-2001). **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.19, n.3, p.237-242, 2004.

SANTANA, J. A. S.; JÚNIOR, J. A. S. S.; SOUTO, J. S.; MACEDO, A. B. Balanço hídrico e classificação climática de Thornthwaite da Estação Ecológica do Seridó, Serra Negra do Norte-RN. *Brasil Florestal*, n 80, Agosto, 2004.

SANTOS, F. A. S.; ANJOS, R. J. Utilização do índice de precipitação padronizada (SPI) no monitoramento da seca no Estado de Pernambuco. In: XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2001. **Anais...** Fortaleza-CE.

SANTOS, R. M. N. Avaliação do índice de Palmer para a caracterização de períodos de seca no estado de São Paulo. Piracicaba, SP: ESALQ, 1998. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

SANTOS, R. S. Avaliação da seca/produtividade agrícola considerando cenários de mudanças climáticas. 70f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola). Universidade de Viçosa. Viçosa-MG. 2008.

SENTELHAS, P. C. Agricultural Drought Indices Proceedings of an Expert Meeting. In: SIVAKUMAR, M. V. K.; MOTH, R. P.; WILHITE, D.A.; WOOD, D. A. Agricultural Drought Indices in Current Use in Brazil. Murcia, Spain. 2-4 June, 2010.

SILVA F. S.; GENZ F.; AGUIAR W.; SILVA N. M. D.; KIPERSTOK A. Avaliação da ocorrência de secas utilizando o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). **Revista Bahia Análise & Dados. Salvador**, v. 23, n. 2, p.461-473. 2013

SILVA, G. M. **Avaliação da ocorrência de seca no Estado do Rio Grande do Sul**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

SILVA. S.C. Caracterização climática do Estado de Goiás. Série Geologia e Mineração, Secretaria de Indústria e Comércio. Governo do Estado de Goiás. Goiânia, 2006.

SILVEIRA, V. P.; ASSIS, S. V. Ocorrências de períodos secos em Pelotas, RS. In: **XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2000, **Anais...** Rio de Janeiro-RJ

STERN, R. D.; COE, R. A model fitting analysis of daily rainfall data. **Journal of the Royal Statistical Society**, v.147, n.1, p.1-34, 1984.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.2, p.424-433, 2006.

THOM, H. C. S. Some methods of climatological analysis. Geneva, World Meteorological Organization, 1966. 53p. (WMO, 199 - TP, 103 - Technical, 81)

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38; p.55–94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATTER, J. R. The water balance. Climatology, New Jersey, Drexel Institute of Thecnology, 104p. 1955.

ULIANA, E. M.; REIS, E. F.; SOUZA, A. P.; SILVA, J. G. F.; XAVIER, A. C. Utilização do índice de precipitação padronizado para a região norte do estado do Espírito Santo. **Irriga**, Botucatu, v.20, n.3, p.414-428, 2015.

VICARIO, L. Evaluación de las sequías hidro-meteorológicas en la cuenca del dique San Roque. Córdoba. 2008. 190f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia) - Instituto Superior de Recursos Hídricos, Córdoba, 2008.